



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

ELEKTRICKÉ AUTOBUSY

ELECTRIC BUSES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Forman

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Tomáš Forman**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Elektrické autobusy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpracování přehledu uspořádání trakčních komponent ve voze. Porovnání vlastností pohonů.
Možnosti rozmístění baterií ve voze.

Cíle bakalářské práce:

Zpracovat přehled různých způsobů uspořádání trakčních komponent ve voze s uvedením výhod a nevýhod pro různé kategorie autobusů.
Porovnání vhodnosti použití synchroních a asynchroních motorů.
Porovnání rozmístění/umístění baterií v podlaze autobusu.
Přehled elektrických autobusů na trhu.
Trendy vývoje v této oblasti.

Seznam doporučené literatury:

VARGA, Bogdan, CLODEAN, Calin, FLORIN, Mariasiu. Electric and Hybrid Buses for Urban Transport: Energy Efficiency Strategies. Switzerland: Springer, 2016. ISBN 978-3-319-41249-8.

BERETTA, Joseph. Automotive electricity: electric drives. Hoboken, NJ: J. Wiley, 2010. ISBN 978-0-84821-095-0.

RAHN, Christopher D. Battery systems engineering. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley&Sons, 2013. ISBN 978-111-9979-500.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce shrnuje poznatky o elektrických autobusech, zejména pak z hlediska rozvržení trakčních komponent ve vozidle. První část se lehce zabývá historií a postupným vývojem elektromobilů a zejména elektrobusů. V druhé části jsou shrnuty nejčastěji využívané zásobníky elektrické energie s uvedením vhodnosti použití pro každý typ. Pozornost je věnována i umístění zásobníků ve vozidle. Následující kapitola se věnuje trakčním elektromotorům, nejčastěji používaným typům a na závěr kapitoly je uvedeno nejběžnější umístění těchto komponent ve vozidle s uvedením výhod a nevýhod pro jednotlivé typy. Ve čtvrté kapitole je výběr elektrických autobusů na současném trhu s důrazem na konstrukční řešení různých výrobců. Předposlední kapitola obsahuje souhrn toho, kam se v současné době trh s elektrobusy posouvá a jaký je aktuální vývoj v této oblasti. Závěrečná kapitola je kapitolou výpočetní a snaží se ukázat zjednodušený postup při výpočtu ideální kapacity baterií na zvolenou trasu elektrobusu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektrobus, baterie, superkapacitor, trakční elektromotor, nízkopodlažní, kapacita

ABSTRACT

This bachelor work is dealing with the topic of electric buses, especially from the point of view concerning the design of traction components within the vehicle. The first part of the thesis is concerned with the history and a gradual development of electric cars, especially electro buses. The second part contains the summary of the most commonly used supply chambers of electric energy; the suitability of the usage of types of these supply chambers is also mentioned. The attention is paid to the location of such supply chambers within the vehicle as well. The following chapter is dealing with the traction electric engines – their most commonly used types, and the end of the chapter is concerned with the most usual placement of such components in the vehicle with the list of plus and cons for individual kinds. In the fourth chapter are listed certain types of electric buses in the contemporary market, with the emphasis laid on the construction solution of individual producers. The last but one chapter contains the summary of what direction is the current market of electric buses moving to, and what is the current development of this field. The very last chapter is the practical one, where I am trying to show the simplified method when calculating the optimal capacity of the batteries needed for the chosen route of the electric bus.

KEYWORDS

Electric bus, battery, ultracapacitor, traction electric motor, low-floor, capacity

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FORMAN, Tomáš. *Elektrické autobusy*. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 69 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením prof. Ing. Josefa Štětiny, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 6. května 2019

.....

Tomáš Forman

PODĚKOVÁNÍ

Tímto chci poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Josefu Štětinovi, Ph.D. za jeho odborné a přínosné rady a připomínky v průběhu vypracovávání této práce.

OBSAH

Úvod	10
1 Historie	11
2 Zásobníky elektrické energie	13
2.1 Olověné baterie (Pb)	14
2.2 Nikl-Kadmiové baterie (Ni-Cd)	14
2.3 Nikl-metal hydridové baterie (NiMH)	15
2.4 Sodíkovo-chlorid nikelnaté baterie (NaNiCl)	15
2.5 Lithiové baterie (Li-ion)	15
2.6 Superkapacity	18
2.7 Umístění zásobníků energie	19
3 Trakční elektromotory	23
3.1 Stejnoseměrné elektromotory	23
3.2 Střídavé elektromotory	26
3.3 Umístění elektromotorů	30
4 Přehled elektrických autobusů na trhu	33
4.1 Škoda Transportation	33
4.2 SOR Libchavy	36
4.3 EKOVA ELECTRIC	38
4.4 Solaris Bus & Coach	39
4.5 Chariot Motors	41
4.6 NFI	42
4.7 BYD	43
5 Aktuální vývoj	45
5.1 Standardizace nabíjení	45
5.2 Optimalizace elektrobusů na linku	46
5.3 Elektrobus jako služba	46
5.4 Autonomní elektrické minibusy	46
6 Ukázka výpočtu kapacity baterií	49
6.1 Výpočet	49
6.2 Výběr vhodné baterie	54
Závěr	56
Seznam použitých symbolů	65
Seznam použitých zkratk	68
Seznam příloh	69

ÚVOD

Elektromobilita nyní zažívá po téměř sto letech opět svůj velký rozvoj. Zatímco na počátku 20. století byla hlavní motivací pro používání elektřiny k pohonu dopravních prostředků zejména jednoduchost celého řešení ve spojení s příjemným a snadným provozem, v současné době je základ někde jinde. První obrození elektromobility přišlo s ropnými krizemi, kdy si člověk začínal uvědomovat, že fosilní paliva zřejmě nebudou k dispozici navždy. Další moment pro zvažování myšlenky zapojit opět elektřinu jako hlavní hnací sílu v dopravě nastal na přelomu tisíciletí, v souvislosti se stále narůstající částí odborné veřejnosti, která upozorňovala na znečišťování ovzduší skleníkovými plyny a dalšími škodlivými látkami. Na tuto situaci začaly automobilky reagovat právě zapojováním elektřiny do pohonů a byly k tomu částečně i nuceny (zejména v Evropě) stále se zpřísňujícími emisními normami. Zda jsou tyto normy pro životní prostředí (a nejen pro něj) opravdu užitečné a pro budoucí rozvoj dopravy smysluplné, je věc druhá, a debata na toto téma začíná veřejností lehce rezonovat.

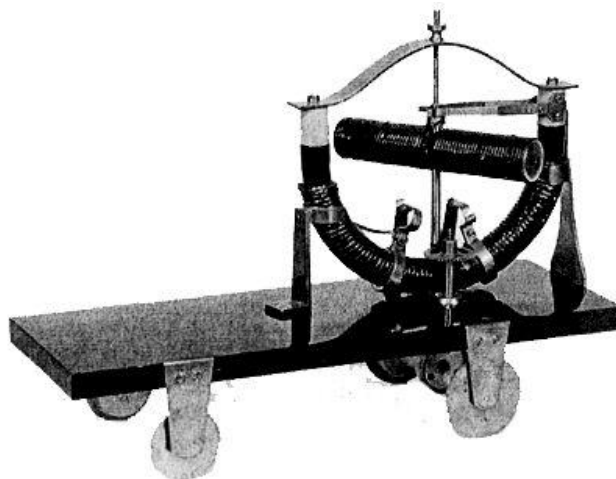
Tato práce se ovšem zabývá zejména konstrukčním řešením elektrických autobusů ve smyslu nalezení vhodných trakčních komponent a jejich umístění do vozidla. Název „elektrický autobus“ nebo i „elektrobus“ lze v literatuře najít pod různými pojmy, někdy ve spojení s autobusem, kdy elektrický pohon není ve voze jako primární (hybridní autobusy), jindy ve spojení s autobusem s elektrickým motorem, kde ovšem jako zdroj energie slouží například vodík (palivočlánkové autobusy). Všechny tyto typy autobusů také nyní zažívají prudký rozvoj. Moje práce je však zaměřena na autobusy, které k pohonu využívají elektromotor a k jeho napájení jsou ve vozidle instalovány dobíjecí baterie či superkapacitory, tedy čistě elektrické součástky.

Elektrobusy se v novodobé éře začínají objevovat již od 90. let minulého století, ale k masivnějšímu nasazení dochází teprve během posledního desetiletí. Hlavním problémem, a to nejen elektrobusů, je především vhodné uchovávání elektrické energie. K tomu již více jak 150 let slouží v drtivé většině baterie. Elektrobusy tedy nyní zažívají prudký rozvoj zejména díky stále se zdokonalujícím technologiím v oblasti uchovávání energie, ať už se jedná o již zmiňované baterie, či o novější technologii superkapacitorů. Ruku v ruce s tím jde i vývoj a vylepšování elektromotorů. Ty se stávají úspěšnějšími, lehčími, menšími a přitom stále výkonnějšími. Také ostatní používané materiály se snaží celkovou hmotnost elektrobusů co nejvíce snížit a tím zvýšit jejich dojezd a snížit spotřebu elektrické energie. V součtu s tím, a také se současnou politikou nakloněnou elektromobilně, se elektrobusy stávají stále více a více vyhledávanými hromadnými dopravními prostředky a vypadá to, že rozvoj bude i nadále pokračovat. Jakým přesně směrem, popřípadě s čím je možno se už teď u současných elektrických autobusů setkat, na to by mohla částečně odpovědět i tato práce.

1 HISTORIE

Za první automobil se spalovacím motorem je považován Benz Patent-Motorwagen Nummer 1 z roku 1886 německého konstruktéra Carla Benze (1844–1929), avšak první elektromobil se objevil o více než 50 let dříve. A ještě na přelomu 19. a 20. století měla v USA elektricky poháněná vozidla 38% podíl na trhu, ve srovnání se 40% podílem parních strojů a jen 22% podílem vozidel s motory s vnitřním spalováním. To bylo zapříčiněno zejména složitou manipulací s neelektrickými vozidly, od namáhavého startování, přes řazení rychlostí, až po nepříjemné výfukové zplodiny [1, 2].

Vznik prvního elektromotoru se datuje do roku 1827 a za jeho vynalezením stojí slovensko-maďarský fyzik a člen Benediktinského řádu Štefan Anián Jedlík (1800–1895). V následujícím roce pak sestrojil i vozík poháněný tímto elektromotorem (*obr. 1*) a ten se uvádí jako první elektrické vozidlo na světě. Ve 30. letech 19. století se začínají objevovat i další elektrické automobily, například v Nizozemsku nebo ve Skotsku, kde je také v roce 1842 sestrojena i první elektrická lokomotiva. K uschování elektrické energie byly použity baterie na jedno použití, protože akumulátory v té době byly teprve v počátcích vývoje [2].



Obr.1 - Jedlíkův elektricky poháněný vozík z r. 1828 [3]

První elektrické automobily a autobusy vznikají ale až v 90. letech 19. století s vývojem zejména lepších elektrických součástek. Příkladem takovýchto součástek byl například vynález generátoru elektrického proudu (dynama) a na jeho principu založeného elektrického motoru, který si jako první nechal patentovat v roce 1866 německý vynálezce a průmyslník Werner von Siemens (1816–1892) anebo vynález (1859, Gaston Planté¹) a zdokonalení (1881, Camille Alphonse Faure²) dobíjecí baterie [2].

Roku 1889 testoval inženýr Radcliffe Ward elektrický autobus a dodávku v jednom a v roce 1896 jich několik nasadil do provozu. Ve stejném roce představil světu také inženýr, vynálezce a průmyslník Thomas Parker (1843–1915) svůj elektrický autobus, ale do většího nasazení se elektrobuses dostávají o více jak 10 let později. V polovině roku 1907 začaly ulicemi Londýna jezdit pravidelné linky elektrických autobusů (*obr. 2*) dopravní společnosti London Electrobuses Company. V největším rozmachu jezdilo těchto elektrobusesů Londýnem až 20 a v porovnání se zhruba 230 klasickými autobusy to nebyl zanedbatelný podíl. Vybaveny

¹ Gaston Planté (1834–1889), francouzský fyzik

² Camille Alphonse Faure (1840–1898), francouzský chemik

byly přibližně 1,5 tunami olověných akumulátorů a s nimi byly schopny na jedno nabití ujet až 60 km. Kapacita činila 34 přepravovaných osob [2, 3, 4].



Obr. 2 - Londýnský elektrobús z r. 1907 [4]

Elektrická vozidla obecně zažívala svůj největší rozmach v prvních zhruba 20 letech 20. století a nasvědčuje tomu i fakt, že na výrobě elektrických autobusů se podílel například americký vynálezce a podnikatel Thomas Alva Edison (1847–1931). S počátkem výstavby kvalitnějších a delších silnic se začala projevovat hlavní nevýhoda elektrických vozidel a tou byl velice omezený dojezd (30–60 km), který navíc ještě umocňovaly velice těžké baterie a pomalá rychlost jízdy ($< 35 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$). Nějakou dobu se elektrická vozidla používala pro městský provoz, avšak jejich vysoká cena (1 750–3 000 dolarů oproti 650 dolarům za základní model Fordu Model T) postupně převážila misku vah jednoznačně na stranu automobilů se spalovacími motory a elektromobily na nějakou dobu zcela vymizely [2].

Postupně se k nim někteří výrobci začínají vracet od 50. let 20. století, ovšem jedná se spíše o testovací prototypy. Větší pozornost se na ně začíná zaměřovat v období obou ropných krizí v 70. letech díky prudkému růstu cen ropy. Reálně se začínají objevovat v posledním desetiletí 20. století, kdy si lidstvo začíná uvědomovat znečišťující efekty spalovacích motorů. V roce 1991 začínají v Kalifornii jezdit první dva elektrobusesy v USA a v dalším roce jich v různých částech země začíná přibývat. Jedná se o 6,7 m dlouhé elektrobusesy s dojezdem okolo 130 km. Po roce 2000 se začínají elektrické autobusy objevovat ve větších množstvích i například v Číně. V tomto období jsou hlavním typem baterií ve vozidlech olověné nebo nikl-kadmiové a nabíjecí časy se pohybují okolo 8 hodin. V roce 2008 například vozí 120 elektrobusesů cestující během LOH v Pekingu, aby se rozšířilo všeobecné povědomí ohledně tohoto typu vozidla. Stále více a více vozidel začíná být nasazováno na městské linky a na přelomu let 2009 a 2010 se začínají objevovat i v Evropě. Standardem už jsou baterie na bázi lithia v různých kombinacích s jinými prvky [5].

V současné době elektrických autobusů jezdí po světě stovky tisíc, z toho podle údajů společnosti Bloomberg 99 % v Číně, kde jich v roce 2017 jezdilo více jak 385 000 [6].

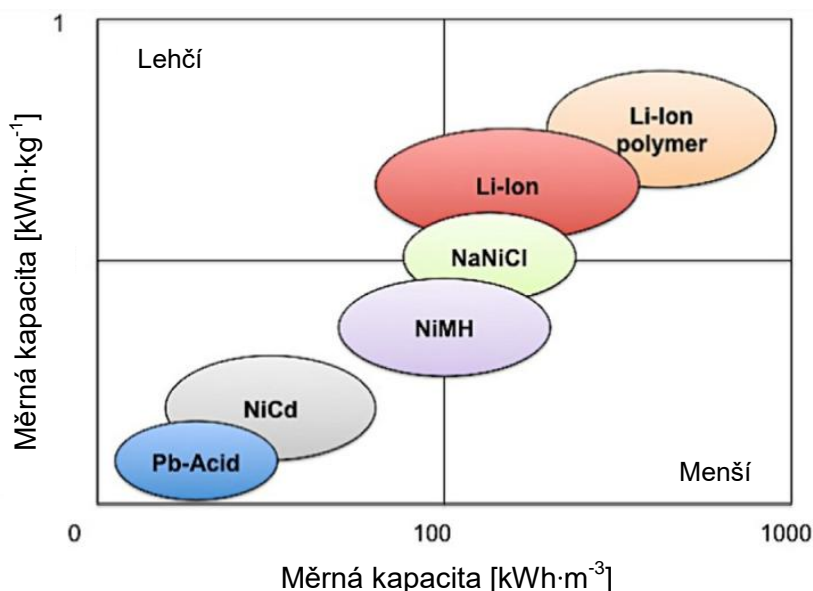
2 ZÁSObNÍKY ELEKTRICKÉ ENERGIE

Jedním z nejvýznamnějších prvků asi ve všech čistě elektrických dopravních prostředcích jsou dozajista zásobníky elektrické energie. U elektrobuseů toto platí ještě o to víc, že na ekonomičnost provozu je zde kladen největší důraz a použitým typem baterie/superkapacitoru lze tento aspekt velice ovlivnit.

Nejdůležitějšími parametry zásobníků jsou měrná kapacita [$\text{kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$] a měrný výkon [$\text{kW}\cdot\text{kg}^{-1}$]. První ze jmenovaných tedy udává celkové množství energie uložené v kilogramu zásobníku a je důležitý proto, že čím větší je celková kapacita, tím vyšší je i dojezd. Ovšem se zvětšující se kapacitou roste i počet zásobníků a tím i hmotnost, která dojezd naopak snižuje. Druhý parametr udává celkový výkon, který lze odebrat z kilogramu zásobníku. To je důležité nejen pro provoz, kdy elektrobuse potřebuje zrychlovat, překonávat terénní nerovnosti, kopce a podobně, ale zejména pro dobíjení. Srovnání hustoty energie v jednotlivých druzích baterií zobrazuje obr. 3 [7].

Z pohledu provozu můžeme uvažovat i další parametry. Úroveň nabití (SoC – State of Charge) určuje procentuální podíl okamžité kapacity k jmenovité kapacitě. Opakem je hloubka vybití (DoD - Depth of Discharge), která se používá jako ukazatel počtu cyklů nabití-vybití, které zásobník zvládne bez poklesu kapacity [8].

V současné době je možné nalézt spoustu typů akumulátorů a superkapacitorů, které se liší zejména svým chemickým složením a z toho vyplývajících vlastností. Nejpoužívanější jsou nyní jednoznačně lithiové (Li-ion) akumulátory a to zejména díky své vysoké měrné kapacitě. Já se pokusím stručně představit nejzákladnější typy baterií a superkapacitorů, a dále pak bude následovat rozvaha nad vhodností umístění těchto zásobníků energie ve vozidle.



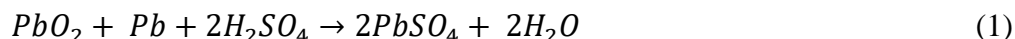
Obr. 3 - Srovnání baterií z hlediska váhy a objemu [9]

Pb-Acid = olovo-kyselina

2.1 OLOVĚNÉ BATERIE (Pb)

Nejstarší baterie v automobilovém průmyslu a v současné době stále nejvíce používaná. Základním stavebním prvkem jsou dvě elektrody, záporná elektroda (katoda) je čistě olověná (Pb), kladná elektroda (anoda) je tvořena oxidem olovičitým (PbO₂). Obě tyto jsou uloženy ve zředěném roztoku kyseliny sírové (H₂SO₄) s vodou. Při vybíjení se materiál obou elektrod přeměňuje na síran olovnatý (PbSO₄) a elektrolyt je ochuzován o kyselinu sírovou a obohacován o vodu, při nabíjení je tento děj opačný. Jmenovité napětí článku jsou 2 V [10].

Chemická reakce vybíjení:



Chemická reakce nabíjení probíhá opačným směrem.

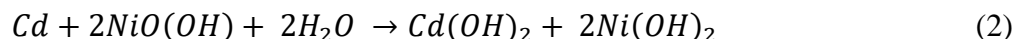
Výhodou těchto baterií spolu s nízkou cenou a bezpečností je, že dokážou produkovat velký rázový proud, a proto se v současné době používají zejména jako startovací baterie v dopravních prostředcích, ale také někdy jako pohon golfových nebo vysokozdvizných vozíků.

Mezi nevýhody lze uvést jejich nízkou měrnou kapacitu nebo potřebu přesně dodržet dobíjecí cykly (nabít na 100 % a poté vybit maximálně o 80 %). Dalším záporem je tzv. sulfatace, která se začíná objevovat, pokud baterii necháme delší čas na nízkém stupni nabití (pod 20 %). Jedná se o vznik krystalického síranu olovnatého místo běžného amorfního, díky čemuž nedochází k řádným chemickým přeměnám během nabíjení/vybíjení a baterie tak ztrácí svou kapacitu. Vzhledem k vyjmenovaným vlastnostem se nepředpokládá využití jako hlavní trakční baterie v elektrických automobilech a autobusech, avšak stále je možné je použít k napájení osvětlení a dalších pomocných systémů vozidel [11].

2.2 NIKL-KADMIOVÉ BATERIE (Ni-Cd)

Typ baterií stále ještě používaný zejména v elektronice, jako jsou notebooky, holicí strojky a další drobné elektronické přístroje. Záporná elektroda je tvořena kadmíem (Cd), kladná pak niklovou sloučeninou (NiO(OH)).

Chemická reakce vybíjení:



Chemická reakce nabíjení probíhá opačným směrem.

Jedná se o typ, který ze všech uvedených vydrží nejvíce nabíjecích cyklů a oproti olověným bateriím má větší měrnou kapacitu. Také těmto bateriím neškodí skladování ve vybitém stavu. Na druhé straně, Ni-Cd baterie jsou dražší (díky přítomnosti niklu), oproti jiným druhům nemají takovou kapacitu, poskytují nižší výstupní napětí (1,2 V) a jsou náchylné na skladování za vyšších teplot, proto je důležité chlazení. Hlavním problémem v používání tohoto typu je však obsah jedovatého kadmia. Kvůli tomu je kladen důraz na pečlivý sběr starých článků a jejich recyklaci tak, aby neškodily životnímu prostředí [9, 12].

2.3 NIKL-METAL HYDRIDOVÉ BATERIE (NiMH)

Relativně nový typ baterií, který má oproti dvěma předchozím vyšší měrnou kapacitu. Zápornou elektrodu tvoří směs kovů, kladnou elektrodu pak sloučenina niklu (NiO(OH)). Od počátku tisíciletí až do současnosti velice rozšířená ve všech odvětvích, avšak postupně začíná být nahrazována Li-ion bateriemi [9, 10].

Chemická reakce vybíjení:



Chemická reakce nabíjení probíhá opačným směrem.

Mezi výhody patří absence paměťového efektu, což pozitivně ovlivňuje schopnost udržet si kapacitu i při méně šetrných nabíjecích cyklech. Také rychlost nabíjení oproti předchozím typům je vyšší. Neobsahují ani žádné prvky, které by představovaly nebezpečí pro životní prostředí. Nevýhodou může být rychlejší samovybíjení a nižší měrná kapacita oproti Li-ion bateriím, stejně tak jako nízké výstupní napětí (1,2 V) [9, 10].

2.4 SODÍKOVO-CHLORID NIKELNATÉ BATERIE (NaNiCl)

Baterie také známá jako ZEBRA (Zero Emissions Batteries Research Activity) vyvinutá v roce 1985. Její operační teplota je okolo 300 °C, jako elektrolyt je používána roztavená směs sodíku, zápornou elektrodu tvoří čistý sodík a kladnou elektrodu směs niklu [13].

Chemická reakce vybíjení:



Chemická reakce nabíjení probíhá opačným směrem.

Výhodami tohoto typu jsou vyšší měrná kapacita, velký počet nabíjecích cyklů a dostupné zdroje chemických prvků potřebných pro výrobu. Hlavní nevýhodou je samozřejmě nutnost udržovat baterii při vysokých teplotách, aby zůstal elektrolyt tekutý, i když i zde byla podniknuta řada výzkumů a podařilo se úspěšně snížit operační teplotu i pod 200 °C. S vysokou teplotou úzce souvisí i možná nebezpečnost, zejména při případných dopravních nehodách. Avšak i přes uvedené nevýhody bylo testováno například několik minibusů ve Francii v roce 2005 v rámci akce „100 Bus Electriques“ s tímto typem baterií [13, 14].

2.5 LITHIOVÉ BATERIE (LI-ION)

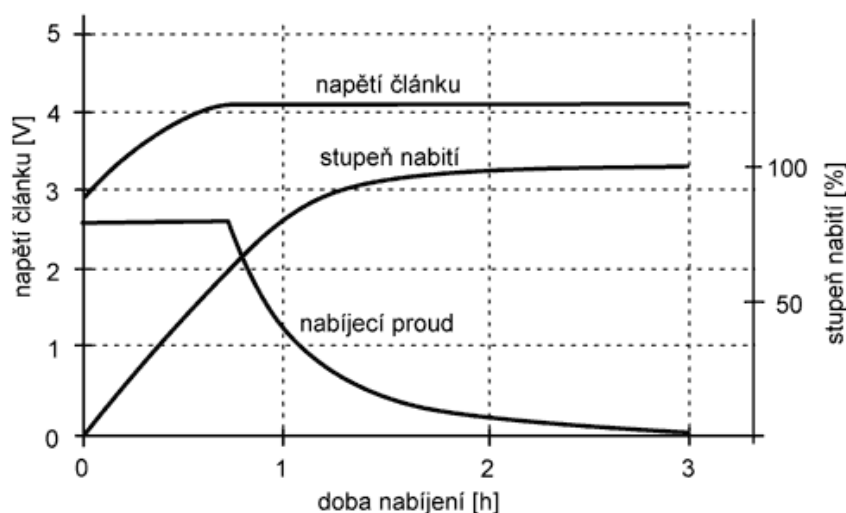
První primární³ lithiové baterie vznikly již v 60. letech minulého století. Hlavně díky své už tehdy vysoké měrné kapacitě se instituce pokoušely sestavit i sekundární lithiové články, protože v tomto typu viděly potenciál. Do širšího povědomí se tak dostaly v roce 1991, kdy je na trh uvedla firma SONY. Jako materiál záporné elektrody se tehdy využíval grafit obohacený o lithium, což se ukázalo jako nejvhodnější pro baterie s velkou měrnou kapacitou a přitom dlouhou životností, vysokou bezpečností a vyšším napětím (3,6 V) [7].

V současnosti jsou téměř veškeré elektrické autobusy vybaveny lithiovými bateriemi a to zejména díky výše uvedeným výhodám. Trendem se stává skládání menších článků do

³ Pouze na jedno použití

skupin, čímž se baterie lépe dají přizpůsobit tvarem okolí, také lze přesně navolit požadovanou kapacitu a výroba takovýchto unifikovaných článků je i levnější. Nejčastěji se využívají baterie typu 18650 (18 mm průměr, 65 mm délka). Stále ovšem probíhá překotný vývoj lithiových akumulátorů, téměř každá automobilka na vývoji baterií buď úzce spolupracuje, nebo si vyvíjí své vlastní bateriové články tak, aby co nejlépe splňovaly jejich požadavky. Proto je obtížné přesně říci, který konkrétní typ by byl úplně nejlepší. Nejčastější chemické složení jsou zejména tyto: LiFePO_4 (LFP), LiFeYPO_4 , LiCoO_2 , LiMn_2O_4 (LMO), LiNiMnCoO_2 (NMC), $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (LTO), LiNiCoAlO_2 (NCA) a další. Existují i tzv. Li-Pol baterie, které využívají jako elektrolyt tekutý polymer. Dále se budu věnovat jen některým typům, nejčastěji používaných u výrobců elektrobuses [7, 15].

I přes veškeré chemické odlišnosti mají lithiové baterie i některé věci společné. Jednou z nich, se kterou se setkáváme i v běžném životě, je způsob nabíjení. Limitujícím faktorem těchto článků je maximální napětí, které nesmí přesáhnout 4,2 V, jinak dochází k degradaci aktivní hmoty. Kvůli tomu neprobíhá nabíjení lineárně, ale nejprve se článek nabije na přibližně 80 % kapacity a poté se výrazně nižšími proudy nabíjí o zbývajících 20 % (obr. 4). Každá baterie proto musí obsahovat řídicí elektronické obvody, které chrání, aby se baterie nepřebíjela, popřípadě aby její napětí naopak příliš nekleslo [7].



Obr. 4 - Charakteristika nabíjení Li-ion baterie [7]

2.5.1 LITHIUM-ŽELEZO-FOSFÁTOVÉ BATERIE (LiFePO_4)

Z anglického názvu označován také zkratkou LFP. Jedná se o starší typ lithiových baterií vyvinutý na Texaské univerzitě v roce 1996. Kladnou elektrodou je uhlík s příměsí LiFePO_4 . Hlavní výhodou tohoto typu je dostupnost a nízká cena prvků, které jsou zároveň netoxické. Akumulátor dokáže pracovat v rozmezí teplot -45 – 70 °C a odolá velmi vysokým teplotám (až 800 °C). Poskytují mírně nižší jmenovité napětí (3,2 V), což je ovšem vykompenzováno vyšší životností (až 10 let a až 3000 nabíjecích cyklů) a schopností dodat vysoký výkon. Baterie také nejsou tolik náchylné ke snižování kapacity, pokud jsou nabitě na 100 %. Při stárnutí se může objevovat problém se zvýšeným samovybíjením. Akumulátory typu LFP používá například čínský výrobce elektrobuses BYD [7, 15].

2.5.2 LITHIUM-ŽELEZO-YTTRIUM-FOSFÁTOVÉ BATERIE (LiFeYPO_4)

Upravené LFP články, anoda doplněna o prvek yttrium, který zvyšuje celkovou stabilitu elektrody. Yttrium zrychluje pohyb elektronů při nižších teplotách, proto je rozsah teplot, při kterých baterie spolehlivě funguje, oproti předchozímu typu lehce rozšířen (-45 – 85 °C). Také obsahuje jednocestnou membránu, která dovoluje únik vznikajících plynů. Jmenovité napětí je stejné s předchozím typem, tedy 3,2 V. Yttriové baterie se vyznačují dlouhou životností, vysokou dobíjecí účinností (až 95 %), téměř plochou dobíjecí křivkou (stálost nabíjecích napětí) a měrnou energií okolo 110 Wh/kg. Baterie tohoto typu od výrobce Winston Battery používá do svých elektrobusů například společnost SOR Libchavy [7].

2.5.3 LITHIUM-TITANOVÉ BATERIE ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$)

Z anglické zkratky také označovány jako LTO. Klasické grafitové anody v baterii jsou zde nahrazeny trvanlivějšími Li-Ti elektrodami. Ty jsou schopné zvládat větší nabíjecí proudy (na grafitových anodách lithium nebylo při vysokých nabíjecích proudech schopno pronikat do struktury a zůstávalo na povrchu ve formě dendritů) díky vyššímu elektrochemickému potenciálu. Titanové baterie lépe odolávají mrazu, kdy při -30 °C klesne kapacita na 80 %. Nevýhodou je malé jmenovité napětí (pouze 2,4 V) a nižší měrná kapacita. Tento typ je ovšem hojně využíván zejména díky svým schopnostem se rychle nabít a vybit (až 10 C^4). Proto jej nalezneme například ve vozidlech Škoda Perun HP nebo EKOVA Electron, které využívají rychlodobíjení vozů na konečných stanicích [7, 15].

2.5.4 LITHIUM-NIKL-MANGAN- KOBALTOVÉ BATERIE (LiNiMnCoO_2)

Z anglického názvu také označovány zkratkou NMC. Jedná se o nově vyvinuté baterie, které vynikají zejména velkou měrnou kapacitou, popřípadě velkými vybíjecími proudy. Katodou je zde kombinace niklu, manganu a kobaltu. Nikl zde slouží jako složka s vysokou měrnou hustotou energie, avšak je velice nestabilní, což vyrovnává mangan, který má naopak vysokou stabilitu. Tyto zmiňované složky se mohou vyskytovat v nejrůznějších poměrech, např. 1:1:1, 5:3:2 a další pro získání optimálních vlastností a ceny. NMC baterie jsou právě díky své vysoké měrné kapacitě hojně využívány pro pohon elektrických vozidel, od koloběžek po elektrobusy. Z nich lze jmenovat třeba nové typy výrobce SOR nebo polského Solarisu [15].

2.5.5 LITHIUM-POLYMEROVÉ BATERIE

V podstatě vylepšené Li-ion akumulátory. Poprvé se na trhu objevily v polovině 90. let minulého století a v současné době nabízí zřejmě nejlepší poměr kapacity a hmotnosti/objemu. Dalšími výhodami jsou velká výdrž nabíjecích cyklů bez poklesu maximální kapacity, minimální samovybití, vysoké napětí (3,7 V) a možnost použít vyšší nabíjecí a vybíjecí proudy (zkracují čas nabití/vybití). Změnou oproti Li-ion je použitý elektrolyt. U běžných lithiových baterií jím je lithiová sůl v organickém rozpouštědle, kdežto u polymerových baterií jím je polymerový kompozit, nejčastěji ve formě gelu. I přes veškeré výhody těchto článků však Li-Pol baterie nejsou tak rozšířené, což je způsobeno převážně vysokou výrobní cenou, která často dosahuje až 10 % celkové ceny elektrického přístroje. Dalšími odrazujícími faktory mohou být postupné stárnutí baterií (pomalé ztrácení kapacity), náchylnost k výbuchům při používání za vyšších teplot, stejně tak jako zničení článků při úplném vybití popřípadě přebití. Věřím však, že s postupným vývojem v této oblasti a odstraňováním nevýhod se tento typ začne čím dál více rozšiřovat, čehož už je nyní

⁴ Násobek hodinové kapacity baterie

důkazem například plzeňský výrobce Škoda, který Li-Pol akumulátory montuje do svých dalekodojezdových elektrobusů Perun HE [9, 16].

Typ baterie	Měrná kapacita [Wh/kg]	Měrná kapacita [W/l]	Měrný výkon [W/kg]	Samovybíjecí koeficient [%/den]	Počet nabíjecích cyklů
Pb	40	70	180	1	500
Ni-Cd	60	100	150	5	1350
NiMH	70	250	1000	2	1350
NaNiCl	125	300	1500	0	1000
Li-ion	125	270	1800	1	1000
Li-Pol	200	300	3500	1	1000

Tab. 1 - Přehled vlastností různých typů baterií [9]

2.6 SUPERKAPACITORY

Někdy označovány též jako ultrakapacitory nebo superkondenzátory. Jedná se vlastně o běžný kondenzátor, pouze se zvýšenou kapacitou ($> 1000 \text{ F}$), což umožňují elektrody s pórovitým povrchem. Poprvé se superkapacitory objevily již v roce 1957, avšak komerčního využití se dočkaly až po více než 20 letech. Tehdy se používaly do počítačů jako záložní zdroj paměti [14, 17].

Elektrická energie se v superkapacitorech skladuje v elektrostatickém poli, na rozdíl od baterií, které fungují na principu elektrochemické reakce. Základ superkapacitoru tvoří dvě vodivé elektrody, na kterých se uchovává náboj, elektrolyt mezi nimi a do něj vložené dielektrikum (separátor). Ze vzorce pro výpočet kapacity

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{l} \quad (5)$$

C = kapacita [F]

ε_0 = permitivita vakua [$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$]

ε_r = poměrná permitivita dielektrika [-]

S = obsah ploch elektrod [m^2]

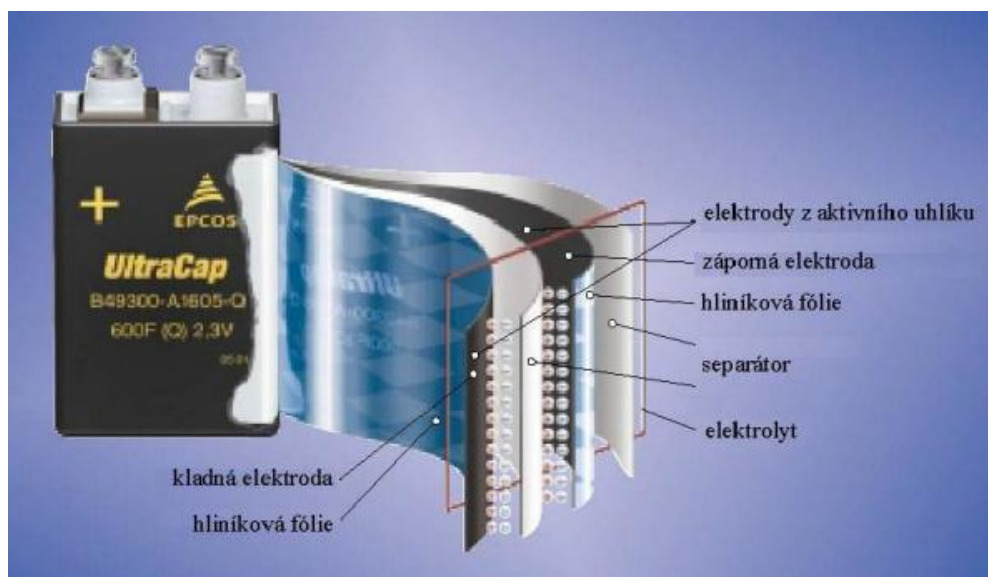
l = vzdálenost elektrod [m]

vyplývá, že kapacitu lze zvětšit buď zmenšením vzdálenosti elektrod nebo zvětšením ploch elektrod. Jelikož vzdálenost elektrod je již tak velice malá, nejvhodnějším způsobem se ukázala být druhá možnost, tedy zvětšení plochy. Toho se dosáhlo použitím velice porézního materiálu, nejčastěji uhlíkovým práškem naneseným na hliníkovou fólii (obr. 5). Začíná se také uvažovat o grafenu jakožto náhradě hliníku. [7, 18].

Důvodů, proč se o superkapacitorech musí v souvislosti s použitím jako trakční komponenty na uchovávání energie mluvit, je několik. Pokud pomineme jeho relativně malou měrnou kapacitu (řádově jednotky až desítky Wh/kg), je obrovskou výhodou extrémně rychlé nabíjení (řádově desítky sekund), možnost nabíjet vysokými výkony (řádově stovky kW) a také oproti

lithiovým bateriím až tisícinásobná životnost. Některé superkapacitory vydrží i 1 000 000 nabíjecích cyklů. Napětí se pohybuje mezi 2 a 3 V. Při vybíjení jejich napětí klesá lineárně k nule, což zamezuje plnému využití energie superkapacitoru a v konečném součtu je tak využitelných zhruba pouze 50 % celkové energie [7, 14].

V současnosti se superkapacitory potýkají s vysokou cenou, ale se zvyšujícím se využíváním se dá očekávat její pokles. Malá kapacita navíc prozatím odsuzuje superkapacitory k používání pouze v elektrobusech na kratší trasy s průběžným dobíjením na koncových zastávkách. Na trhu již jsou výrobci, kteří pro pohon svých elektrobuseů zvolili tuto technologii. Jedním z nich je například izraelsko-bulharský výrobce Chariot Motors, jehož elektrické autobusy jezdí v několika evropských a izraelských městech.



Obr. 5 - Řez superkapacitorovým článkem [18]

2.7 UMÍSTĚNÍ ZÁSOBNÍKŮ ENERGIE

Přes veškerý proběhlý a nadále probíhající vývoj v oblasti zásobníků elektrické energie jsou stále tyto komponenty zřejmě nejslabší součástí elektrických vozidel. Nejslabší ve smyslu omezujícím pro převratný posun dopředu z hlediska inovace. Závisí na nich nejen vlastnosti výsledného elektrobuse, jako jsou dojezd a hmotnost, ale také je potřeba vymyslet jejich nejideálnější umístění na vozidle. Jelikož elektrobusey slouží pro přepravu mnoha osob v jednom vozidle, prostor zde hraje naprosto zásadní roli, stejně tak jako komfort pobytu ve vozidle. V této kapitole se pokusím shrnout nejčastější konstrukční řešení z hlediska umístění.

2.7.1 PODLAHA

Tato varianta se jeví ideální zejména proto, že by zásobníky energie nezabíraly prostor pro cestující a těžiště vozidla by bylo umístěno velice nízko vzhledem ke značné hmotnosti baterií, což by se projevilo pozitivně na jízdních vlastnostech. Také chlazení by nebyl takový problém, pokud by byl vhodně využit vzduch obtékající vozidlo zespodu. Pokud si ovšem uvědomíme oblast provozu elektrobuseů, kterým jsou v drtivé většině města, nalezneme jedno zásadní negativum, které umístění baterií v podlaze téměř vylučuje. Tento faktor je nízkopodlažnost. V současné době se městské autobusy staví výlučně nízkopodlažní konstrukce a umístění zásobníků energie do oblasti podlahy by znamenalo nutné zvýšení její

výšky v oblasti pro cestující. V případě použití centrálního motoru za zadní nápravou by ovšem alespoň část trakčních baterií umístěna v podlaze být mohla, jelikož zadní část podlahy už tak zvýšena bude právě díky umístění elektromotoru. Jako zástupce takového řešení lze uvést čínského výrobce BYD s modelem 12M electric (*obr. 6*).

Jediným typem elektrických autobusů, kde by umístění v podlaze ve větší míře bylo možné, jsou dálkové elektrobusy. Tyto vozidla nejsou nízkopodlažní, což by umožňovalo alespoň část zásobníků energie přesunout do prostoru pod sedadly, ovšem zde by ubíraly prostor ve schránkách pro zavazadla cestujících. Zatím se na trhu vyskytuje pouze hrstka výrobců, kteří produkují dálkové elektrické autobusy (např. BYD a modelová řada C) a jejich informace o produktech bývají velice strohé, proto se mi nepodařilo polohu baterií v jejich vozidlech zjistit.



Obr. 6 - Umístění baterií ve voze BYD 12M electric [19]

2.7.2 ZADNÍ PŘEVIS

Asi nejčastější konstrukční řešení, volené spousty autobusových výrobců, jsou baterie nebo superkapacitory umístěné za zadními koly v tzv. zadním převisu. Umožňuje téměř shodnou karoserii jak pro klasické autobusy se spalovacími motory, tak právě pro elektrické autobusy, čímž výrobce ušetří za vývoj. U dieselových autobusů se v zadním převisu normálně nachází objemný a těžký spalovací motor (běžně 500–900 kg). Ten je v případě elektrobusu vymontován a na jeho místo jsou umístěny zásobníky elektrické energie [20].

Výhodou může být, že karoserie je v této části vozu již dimenzovaná na větší hmotnosti a nemusí probíhat velké úpravy. Také přístup k bateriím je snadný a lze jej dobře realizovat víkem v zadní části. Problematické je zde ovšem chlazení, neboť baterie se nachází v relativně malém prostoru bez jednoduchého přístupu vzduchu. Velikost zásobníků je často tak velká (zejména u dalekodojezdových elektrobusů), že zabírá celou zadní stěnu a ve vozidle proto není zadní okno. Největším negativem ovšem zůstává zmenšení prostoru uvnitř vozidla a tím celkové snížení přepravní kapacity.

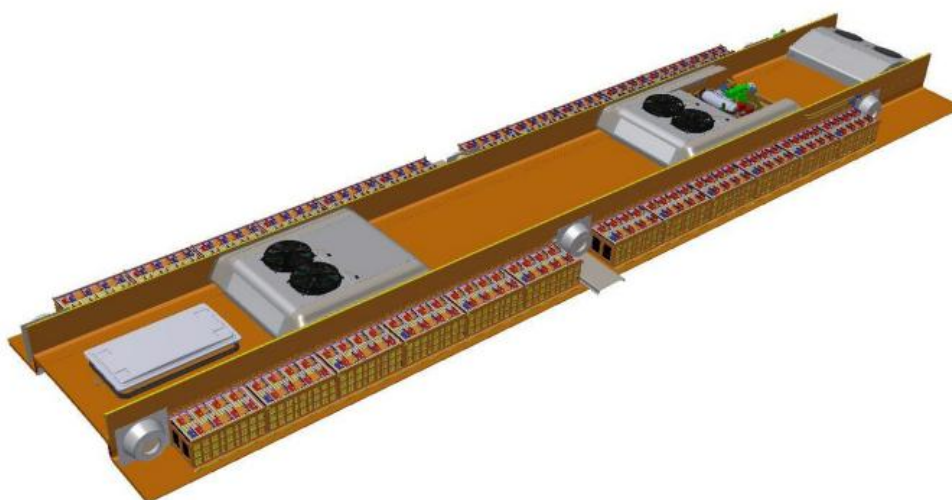
Řešení umístění zásobníků v zadním převisu může být buď jediným místem v autobusu, kde jsou baterie uloženy (např. SOR EBN 10,5 viz *obr. 7*), nebo bývá kombinováno ještě s jinými místy, jako přední nadkolí nebo střecha, a to proto, aby byla hmotnost baterií lépe rozložena a aby zůstalo zachováno zadní okno. To upřednostňují například výrobci jako je Škoda, EKOVA nebo polský Solaris.



Obr. 7 - Umístění trakčních baterií ve voze SOR EBN 10,5 [21]

2.7.3 STŘECHA

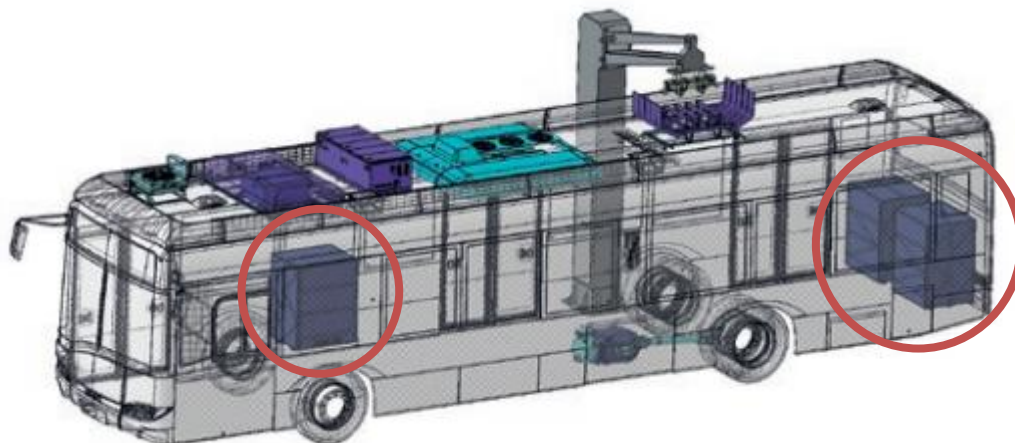
Další možností, kam umístit baterie, je střecha elektrobuse. Výhoda spočívá v tom, že baterie na střeše nezabírají žádný prostor uvnitř autobusu, čímž může dopravce plně využít jeho velikost k přepravě co největšího počtu cestujících. Chlazení lze zároveň za použití vhodné konstrukce velice efektivně řešit vzduchem obtékajícím vozidlo a netřeba používat složité chladičové systémy, jako je tomu při umístění baterií v zadním převisu. Navíc se v současnosti začíná čím dál více uplatňovat skládání baterií typu 18650 do různě velkých bloků, a díky tomu je možné docílit ideálního rozložení akumulátorů téměř po celé délce střechy. Lehkým negativem je kvůli tomu mírně zvětšená výška vozu. Hlavní nevýhodou ovšem zůstává velká hmotnost trakčních baterií pohybující se okolo 2 tun (v závislosti na kapacitě a použitém typu baterií). Tu musí konstruktéři zohlednit a adekvátně vyztužit střešní konstrukci. Nejlogičtější tedy vypadá umístit baterie co nejbližší krajům střechy, aby většinu hmotnosti nesly boční sloupky a ne samotná plocha střechy. Tento způsob umístění se rozhodl použít například výrobce SOR u svého nového elektrobuse NS 12 electric (obr. 8).



Obr. 8 - Rozložení trakčních baterií na střeše vozu SOR NS 12 electric [22]

2.7.4 PŘEDNÍ NADKOLÍ

V tomto případě se vždy jedná pouze o doplňující řešení například k zadnímu převisu a nikdy nejsou veškeré trakční baterie pouze nad předními koly (*obr. 9*). Volba tohoto místa pro uložení vychází z velké únosnosti, jelikož jsou baterie téměř přesně nad osou kola a to tak nese váhu a nemusí se vyztužovat okolní karoserie. Zároveň v případě nízkopodlažních autobusů často nebývá nadkolí využito pro sedačky ani pro stání cestujících a lze tak tuto oblast efektivně využít, aniž by se razantně ubral prostor pro cestující. Nevýhodou pak je nemožnost chladit baterie venkovním vzduchem a ty tak musí mít vlastní chladič systém.



Obr. 9 - Umístění trakčních baterií ve vozidle Škoda Perun HP[23]

3 TRAKČNÍ ELEKTROMOTORY

Elektromotor je součástka, která převádí elektrickou energii na pohybovou a může tak být využita jako pohon pro další různá zařízení. Od doby svého vzniku v roce 1866 prošly elektromotory intenzivním vývojem a největší rozvoj zaznamenaly od poloviny minulého století díky vzniku výkonové polovodičové elektrotechniky a řídicích mikroprocesorů. Hlavním vylepšením bylo zmenšení rozměrů a přitom zvýšení výkonu a snížení spotřeby elektrické energie. V dnešní době elektromotory v různých velikostech a výkonech nalezneme téměř všude, od pohonu ruční vrtačky přes jezdící schody nebo motory pohánějící robotická ramena na výrobních linkách až po obrovské elektromotory důlních těžebních strojů.

Elektromotor sestává pouze ze dvou hlavních částí - statoru (nepohyblivé části) a rotoru (pohybující se části). Mezi nimi je vzduchová mezera. Statorem bývá v drtivé většině vnější část a rotorem část vnitřní. Stator i rotor je opatřen vinutím, které bývá rozložené, a sestává buď z cívek v drážkách, nebo z cívek nasunutých na vyniklých pólech a umístěných po obvodu vzduchové mezery. Cívky mohou být u některých typů nahrazeny permanentními magnety. Připojeny bývají elektromotory jak ke střídavým, tak i stejnosměrným proudům, přičemž zdroje střídavého proudu jsou nejčastěji třífázové (běžná rozvodná síť), ovšem existují i motory jednofázové, popřípadě s jiným počtem fází [24].

Masová rozšířenost elektromotorů je dána zejména tím, že jsou napájeny právě elektrinou a lze je tedy využít všude tam, kde by byly spalovací motory nevhodné. Dále je to dáno jejich jednoduchou stavbou a s tím související spolehlivostí. Jelikož je v motoru minimum pohybujících se částí, navíc nedochází ke styku rotačních a stacionárních částí, většina elektromotorů je téměř bezúdržbová. Kladem je také vysoká účinnost, pohybující se okolo 90 %. Dalším výhodám a nevýhodám se budu věnovat při rozboru jednotlivých druhů elektromotorů [24].

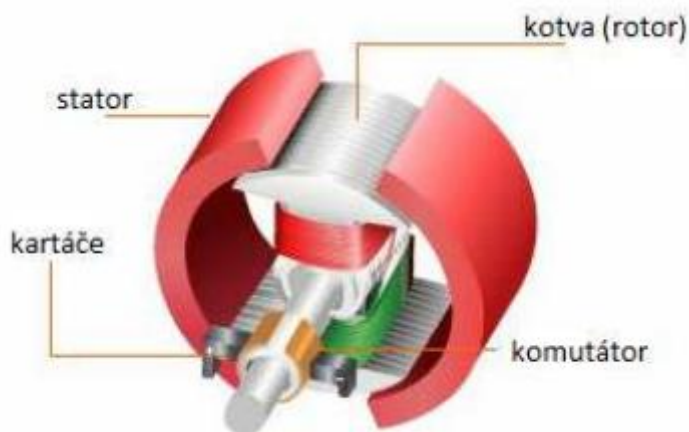
3.1 STEJNOSMĚRNÉ ELEKTROMOTORY

Jedná se o nejstarší typ elektromotorů. Ještě donedávna stejnosměrné motory s permanentními magnety dominovaly v použití jako trakční motory u elektrických vozidel (lokomotivy, tramvaje, trolejbusy a další), avšak pomalu začínají být nahrazovány synchronními a asynchronními typy. Vyrábí se v různých výkonech od jednotek wattů až po desítky megawattů.

Konstrukce se skládá ze tří částí. První je stator (nepohybující se část), který je po obvodě osazen opačně orientovanými póly. Ty jsou buzeny buď cívkami, nebo permanentními magnety. Často jsou hlavní póly osazeny pomocnými póly, které zlepšují komutaci. Druhá část je rotor (pohybující se část), nazývaný též kotva. Je složen z dynamových plechů, které v sobě mají v drážkách rozložené vinutí s cívkami. Ty jsou pak vyvedeny k mechanickému komutátoru s kartáči, což je třetí část stejnosměrného elektromotoru. Komutátor zajišťuje cyklickou změnu proudu směřujícího do cívek rotoru a díky tomu je zachován souhlasný smysl točivého momentu vytvářeného v magnetickém poli hlavních pólů. Přivedení proudu do cívek zajišťují grafitové kartáče, dosedající na komutátor. Základní konstrukci zachycuje obr. 10 [24, 25].

S tím také souvisí hlavní nevýhoda těchto motorů. Při otáčení komutátoru vzhledem ke kartáčům vzniká jiskření, tím se ničí povrch komutátoru a z toho plyne větší opotřebení a následná potřeba měnit tyto součástky za neopotřebované. Dalšími nevýhodami jsou

poměrně velké rozměry a konstrukční složitost, dále pak menší účinnost oproti střídavým elektromotorům. Výhodu tvoří možnost přesného řízení otáček buď změnou napětí kotvy při konstantním buzení, nebo změnou buzení při konstantním napětí kotvy. Využitelný také může být fakt, že stejnosměrné motory mají kontinuální přechod z jízdy na brzdění a v režimu brzdění fungují jako generátory. Je tedy možnost využít rekuperaci například při jízdě z kopce a tím prodloužit dojezd elektrobusu. Tyto motory bývají obvykle levnější než motory na střídavý proud [24, 25, 26].



Obr. 10 - Zjednodušený stejnosměrný motor [25]

3.1.1 STEJNOSMĚRNÉ MOTORY S CIZÍM BUZENÍM

Napájení vinutí hlavních pólů je vedeno z nezávislého zdroje. Motor má maximální točivý moment při nulových otáčkách a poté klesá přibližně lineárně. Otáčky jsou omezeny na zhruba 7000 min^{-1} , a proto je s tímto motorem často spjata převodovka. Motor má tvrdou otáčkovou charakteristiku a tudíž otáčky nejsou závislé na zatížení. Výhodou je jednoduchá regulace otáček v širokém rozsahu a možnost krátkodobého přetížení, využitelného zejména při rozjezdech. Tyto motory se využívají zejména v průmyslových pohonech [24, 27].

3.1.2 STEJNOSMĚRNÉ MOTORY SE SÉRIOVÝM BUZENÍM

Budicí vinutí je zapojeno do série s kotvou. Maximální točivý moment je dosažen při nulových otáčkách, avšak poté s narůstajícími otáčkami rychle klesá. Otáčky pak klesají se zatížením motoru a díky tomu je možné rozbíhat velké setrvačné hmoty. Při malém zatížení mohou naopak otáčky vzrůst na vysokou hodnotu, což je potřeba hlídat z důvodu možného poškození motoru. Tento typ elektromotoru je hojně využíván pro pohon starších elektrických kolejových vozidel (lokomotivy, tramvaje, metro) [26, 27].

3.1.3 STEJNOSMĚRNÉ MOTORY S PARALELNÍM BUZENÍM

Také označovány jako derivační stejnosměrné motory. Budicí vinutí je zapojeno paralelně k vinutí kotvy. Průběh točivého momentu v závislosti na otáčkách je velice podobný motorům s cizím buzením, avšak zde klesá pomaleji. Otáčky u tohoto typu lze plynule řídit změnou odporu (nejčastěji se k tomuto účelu využívá reostat) připojeného sériově k vinutí kotvy. Stejně jako u sériových motorů, i zde je potřeba hlídat, aby byl motor stále zatížen, jinak hrozí vysoký nárůst otáček a tím poškození stroje. Díky výhodnému průběhu točivého momentu je tento typ hojně využíván u kolových elektrických vozidel starší konstrukce (např. trolejbusy) [24, 26, 27].

3.1.4 STEJNOSMĚRNÉ MOTORY SE SMÍŠENÝM BUZENÍM

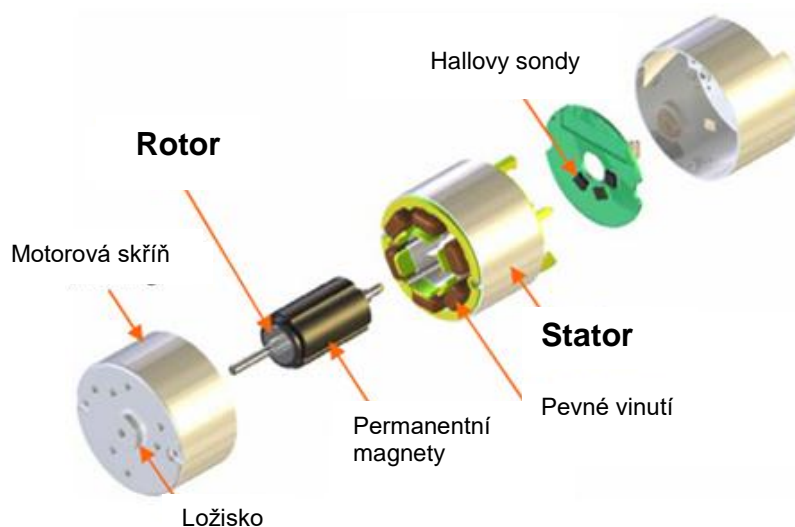
Nazývány také jako kompaundní motory. Na hlavních pólech má dvojce vinutí. Hlavní budicí vinutí zapojené paralelně a vinutí kotvy zapojené sériově. Vinutí kotvy působí buď souhlasně s hlavním vinutím (kompaundace), nebo nesouhlasně (protikompaundace). Motor kombinuje výhody předešlých, zejména je zde zabráněno nárůstu otáček při malém zatížení a při větším zatížení jsou otáčky víceméně stálé. Častěji se používá kompaundní zapojení.

3.1.5 BEZKARTÁČOVÉ STEJNOSMĚRNÉ MOTORY

Bývá označován zkratkou BLDC (z anglického Brushless Direct Current). Jedná se o nejnovější a také zřejmě nejlepší z typů stejnosměrných motorů, který pomalu proniká do širšího povědomí a začíná být čím dál více využíván všude tam, kde je podmínkou bezúdržbovost (a tedy vysoká spolehlivost) v kombinaci se stejnosměrným napájením. To běžné komutátorové motory nemohou splnit. V současnosti nalezneme BLDC motory v modelářské technice, v akumulátorových náradích, v armádních a leteckých pohonných systémech a také v pohonných systémech různých vozidel, od vysokozdvizných vozíků, přes zemědělskou mobilní techniku až po nejrůznější dopravní prostředky [28].

Co se konstrukce týče, v porovnání s klasickým komutátorovým motorem jsou zde vyměněny pozice statoru a rotoru. Stator je osazen pevným vinutím a uvnitř nebo vně rotuje rotor, obvykle osazen permanentními magnety. Motor tedy nemá žádné rotující elektronické součásti. Zjednodušenou konstrukci zobrazuje *obr. 11* [28].

Problém kartáčových stejnosměrných motorů je v potřebě dokonalé komutace během otáčení, k čemuž jsou zapotřebí kartáče v dotyku s komutátorem. U BLDC motorů je komutace vyřešena elektronicky a části jako je komutátor a kartáče tedy vůbec neobsahuje. Díky tomu mohou být tyto elektromotory menší než ostatní stejnosměrné motory. Nedílnou součástí je elektronická řídicí jednotka, která řídí napájení jednotlivých vinutí statoru. Přepínání jednotlivých vinutí je měněno v závislosti na potřebách motoru. K dokonalé elektronické komutaci je třeba znát přesnou polohu rotoru vůči statoru. To zajišťují nejčastěji tzv. Hallovy sondy. Díky přítomnosti mikroprocesoru je hlídána spousta dalších parametrů, jako je ochrana proti přehřátí, proti příliš velkým otáčkám nebo proti přetížení. Celkově ovšem přítomnost mikroprocesoru a sond také zvyšuje cenu BLDC motorů a proto jsou při volbě často upřednostňovány motory na střídavý elektrický proud. [26, 28].



Obr. 11 - BLDC motor a jeho části [29]

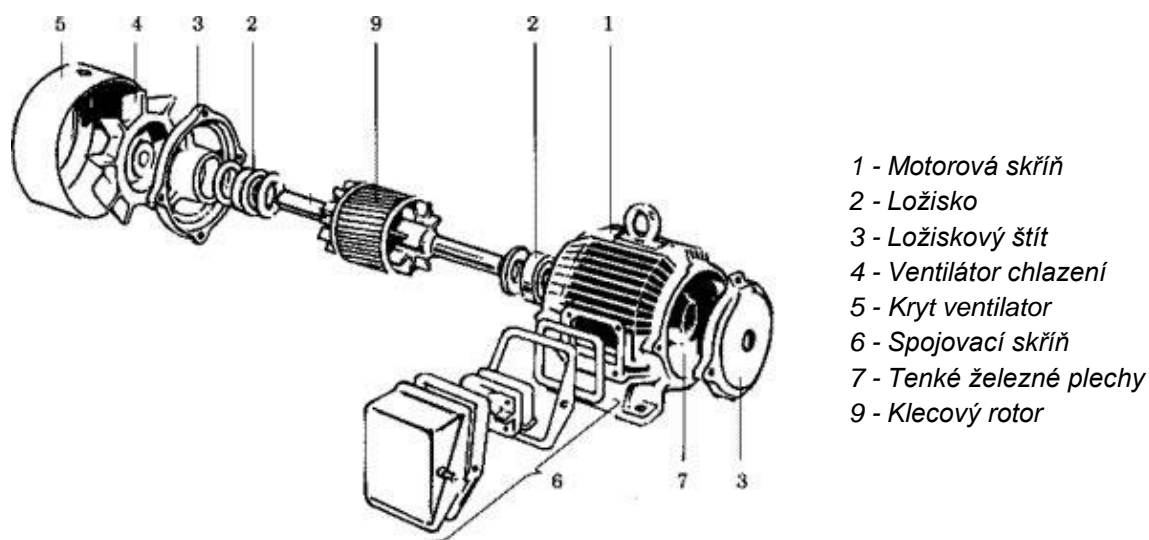
3.2 STŘÍDAVÉ ELEKTROMOTORY

Jak již bylo zmíněno, stejnosměrné motory pomalu ustupují a začínají je nahrazovat motory na střídavý elektrický proud. Jedná se v současnosti o nejrozšířenější typ elektromotorů, mimo dalších výhod kvůli tomu, že běžná rozvodná síť má střídavý proud. Člověk se s nimi setkává ve svém běžném životě velice často, protože téměř všude tam, kde je nějaká součástka s elektromotorem zapojena byt' jen do klasické 230 V jednofázové zásuvky, je tento motor v drtivé většině střídavý. Tyto motory jsou pak jednofázové a vyrábí se s menšími výkony (nejčastěji do 1 kW). Ve větších podnicích a všude tam, kde jsou potřebné větší výkony, je využíván třífázový napájecí proud a tyto motory nazýváme třífázové. Podle toho, zda se rotor otáčí či neotáčí se stejnými otáčkami, jako jsou otáčky magnetického pole statoru, dělíme střídavé elektromotory na synchronní a asynchronní.

3.2.1 ASYNCHRONNÍ ELEKTROMOTORY

Asynchronní motory pracují na principu magnetické indukce napětí, a proto bývají nazývány i jako indukční motory. Poprvé si jej nechal patentovat v roce 1888 fyzik, konstruktér a vynálezce Nikola Tesla. Díky jednoduché konstrukci, bezúdržbovému chodu a velmi dobré regulaci otáček se jedná o nejběžněji používaný elektrický motor současnosti [12].

Funkce motoru vychází z točivého magnetického pole ve vzduchové mezeře mezi vnějším státorem a vnitřním rotorem. Stator (nejčastěji ze slitiny hliníku) obsahuje statorové dynamoplechy o tloušťce 0,3–0,5 mm, na jejichž vnitřní straně je v podélných drážkách uloženo statorové (nejběžněji trojfázové) vinutí. Vinutí bývá ve svazcích a počty svazků dosahují násobků 3, tedy $3n$, kde n je počet svazků. Fáze vinutí jsou proti sobě prostorově posunuty o 120° , respektive o $120^\circ/n$. Cyklickým sepínáním jednotlivých fází vzniká rotační magnetické pole stálého tvaru, otáčející se synchronní rychlostí. Uvnitř statoru je otáčející se rotor, kterým je zde, na rotující hřídeli nasazená, tzv. klecová kotva, také zvaná jako kotva nakrátko. Rotorové vinutí je tedy tvořeno klecí, sestávající z tyčí z mědi nebo hliníku, popřípadě mosazi, po obou stranách spojenými zkratovacími kruhy stejného materiálu. Konstrukce motoru viz *obr. 13* [24, 25, 26].



Obr. 13 - Schéma asynchronního motoru [25]

Proměnlivým magnetickým polem statoru se v tyčích rotoru indukuje napětí a vyvolává tak průtok indukovaných proudů těmito tyčemi. Na ty pak působí síla (tzv. Lorentzova síla; síla působící na vodiče s protékajícím proudem v magnetickém poli), která roztáčí celou kotvu. Jelikož se napětí indukuje pouze v případě, že se magnetické pole vůči kotvě mění, je zapotřebí, aby kotva neměla stejné otáčky jako ono magnetické pole. Dostáváme tedy asynchronní motor. Rotor má oproti magnetickému poli statoru nižší otáčky, tzv. skluz, pohybující se do 10 %. Skluz lze vyjádřit následující rovnicí:

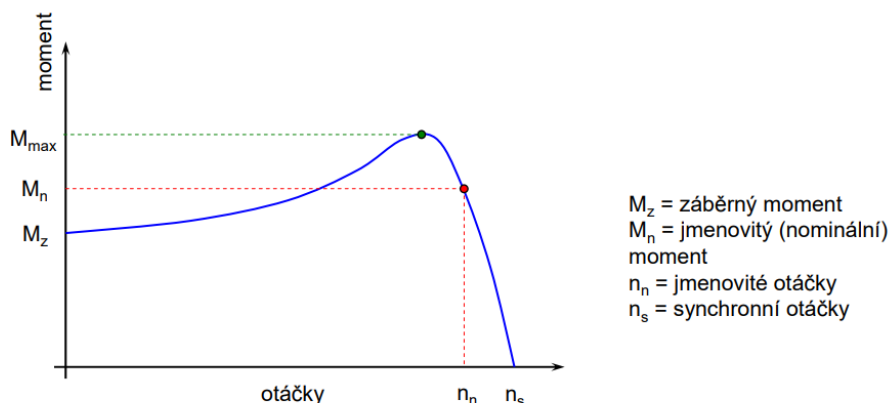
$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \cdot 100 \quad (6)$$

s = skluz [%]

n_s = otáčky magnetického pole statoru [min^{-1}]

n_r = otáčky rotoru [min^{-1}]

Čím je motor zatíženější, tím je skluz větší. Se zvětšujícím se skluzem roste i indukovaný proud a tím i roztáčející síla. Takto jsou udržovány asynchronní otáčky. Pokud dojde u asynchronních motorů k synchronním otáčkám, točivý moment je nulový. Pro roztočení motoru je potřebný startovací moment. S klesajícím skluzem (otáčky rotoru se blíží otáčkám magnetického pole statoru) se točivý moment zvyšuje až do kritického bodu a poté prudce klesá. Momentová charakteristika je znázorněna na obr. 12 [24, 25, 26].



Obr. 12 - Momentová charakteristika asynchronního motoru [30]

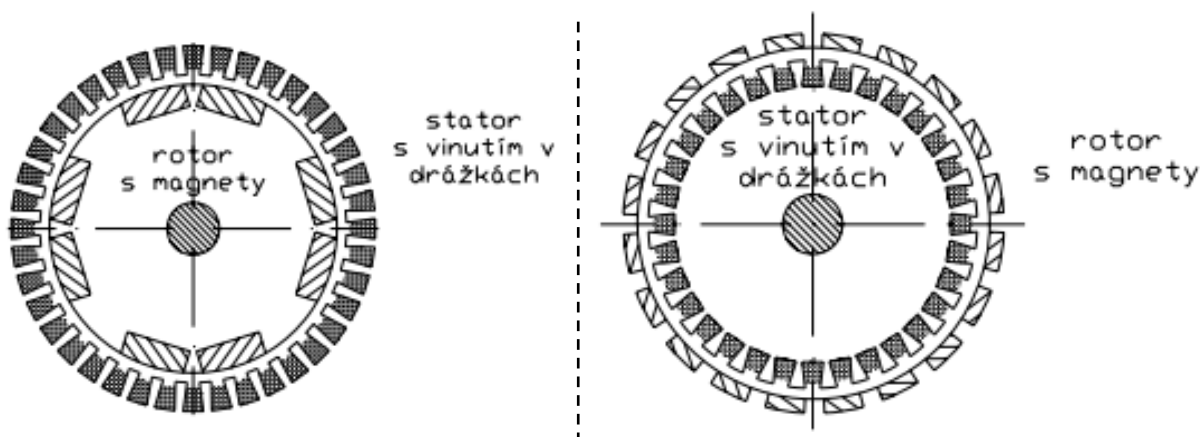
Otáčky motoru lze v tomto případě řídit několika způsoby: změnou skluzu, změnou počtu pólů, změnou napětí a změnou kmitočtu. V současné době se ale díky vývoji moderních řídicích systémů používá pouze jediný způsob regulace. Tím je poslední jmenovaný, tedy změna frekvence procházejícího proudu. K tomu se používá tzv. frekvenční měnič. Ten umožňuje regulaci otáček v širokém spektru. Levnější verzí je tzv. SoftStartér, který zajišťuje bezpečný rozběh a zastavení motoru [24].

Největší výhodou asynchronního elektromotoru je, jak už bylo zmíněno, jeho jednoduchost a z toho vyplývající spolehlivost a bezúdržbovost. To je pro použití jako pohon elektrobusů velice důležité, protože často jsou elektromotory umístěny v místech se špatným přístupem. Dalšími výhodami, hlavně oproti stejnosměrným motorům, jsou nižší hmotnost a velikost, vyšší účinnost a také vyšší dosažitelné otáčky (až $20\,000\text{ min}^{-1}$), které je navíc možné s vývojem moderních trakčních měničů spolehlivě a přesně měnit. Motor také dokáže dobře využívat rekuperační brzdění. Příznivá je i cena, která je snížena jednoduchostí a zejména tím, že je možná hromadná výroba. Nevýhodou při použití napájení z baterií je potřeba tzv. tyristoru pro převod stejnosměrného proudu na střídavý [26, 27].

3.2.2 SYNCHRONNÍ ELEKTROMOTORY

Synchronní motory jsou známy již dlouho a po většinu této doby byly využívány v drtivé většině jako alternátory elektrického proudu, například v elektrárnách a dynamech. Jako motory se začínají nasazovat až v posledních asi 20 letech. Ze začátku jen v průmyslových servopohonech a všude tam, kde byla nutnost stálosti otáček (například motorky pro gramofony, hodinky apod.), s aplikací permanentních magnetů, které nahradily budicí vinutí, pak nachází synchronní motory uplatnění i jako trakční pohony pro kolejová i nekolejová vozidla. Zde spolu s asynchronními motory vytlačují starší stejnosměrné a krokové motory. K napájení se běžně využívá trojfázový střídavý proud, ovšem lze nalézt i motory se šesti a více fázemi. Nadále budu v této kapitole popisovat synchronní motor s permanentními magnety, také zvaný PMSM (z anglického Permanent Magnet Synchronous Motor), jelikož se pro pohon elektrobusů jiné synchronní motory nepoužívají [31, 32].

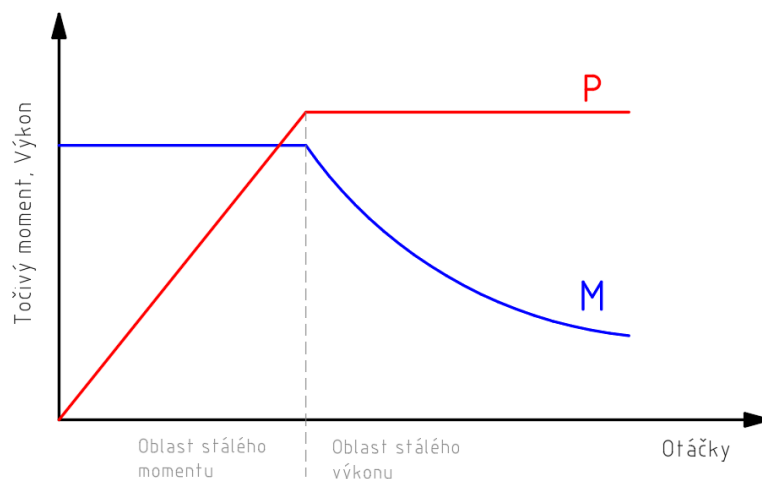
Konstrukce PMSM je velmi podobná asynchronním motorům. Stator tvoří nepohyblivou část a nese v sobě nejčastěji trojfázové statorové vinutí z měděných izolovaných vodičů, které se vkládají do drážek. Rotor se v tomto případě liší od rotorů asynchronních motorů. Zde je složen z plechů a do nich vložených permanentních magnetů se střídavou polaritou, jež mohou být v současné době podle složení dvojího druhu. Neodymové magnety, skládající se ze slitiny neodymu, železa a bóru (např. $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$), se používají častěji, zejména pro jejich příznivější cenu. Druhým typem jsou samariové magnety, složené ze slitin samaria a kobaltu (např. $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$). Ty mají zase vyšší protikorozi ochrannu a jsou schopné fungovat až do zhruba $300\text{ }^\circ\text{C}$, na rozdíl od neodymových, které svou magnetickou schopnost ztrácí už při zhruba $100\text{ }^\circ\text{C}$ ⁵. Podle umístění magnetů na rotoru rozlišujeme motory s vyniklými póly a rotory s hladkým povrchem (magnety zapuštěny do rotoru). Běžně se vyskytují synchronní motory s vnějším statorem a vnitřním rotorem, ale pokud chceme umístit motory přímo do nábojů kol, využívá se obrácená konstrukce, tedy stator uvnitř a na něm nasazený rotor, který je připevněn rovnou ke kolu. Schémata obou motorů jsou na *obr. 14*. V současné době se věnuje velká pozornost optimalizaci rozměrů, hlavně poměru délky a průměru. S tím také souvisí počet magnetů rozmístěných po obvodu vnějšího rotoru. Obecně se uvádí, že účinnost dlouhého motoru je až o 3 % vyšší než krátkého. Celková účinnost pak přesahuje 90 % [31, 33].



Obr. 14 - PMSM s vnitřním a vnějším rotorem [33]

⁵ Přechod materiálů z feromagnetismu na paramagnetismus určuje tzv. Curieův bod. Pro různé materiály je různá teplota Curieova bodu. Například železo má tento bod na teplotě $768\text{ }^\circ\text{C}$.

Princip fungování synchronních elektromotorů je jednoduchý. Střídavý proud procházející cyklicky jednotlivými fázemi vinutí statoru vytváří rotační magnetické pole. To zasahuje k magnetům na rotoru a ty se tak snaží v tomto poli zůstat. Jelikož je magnetické pole statoru točivé, točí se i rotor a to se synchronními otáčkami jako má magnetické pole statoru. S přibývajícím zatížením motoru si rotor stále zachovává synchronní otáčky, avšak je za magnetickým polem zpožděn o určitý úhel. Jestliže zátěž překročí startovací výkon, moment dosáhne tzv. bodu zvratu, motor vypadne ze synchronních otáček a zastaví se.



Obr. 15 - Momentová a výkonová charakteristika PMSM

Otáčky se řídí změnou frekvence napětí. O to se starají elektronické měniče napětí s říditelnou výstupní frekvencí, což jsou výkonové polovodičové prvky obsahující tyristory. Problémem u synchronních motorů je zejména jejich rozjezd. Pokud by se magnetické pole statoru začalo hned od začátku točit rychle, rotor by se neroztočil. Motor totiž vyvíjí točivý moment, jen pokud jsou otáčky synchronní. Dříve se používaly různá řešení pro rozběh synchronních motorů, jako například asynchronní rozběh a až poté přechod do synchronního módu, nebo rozběh indukčním motorem. Dnes start zajišťují právě již zmíněné měniče napětí, které jsou naprogramovány tak, aby se frekvence napětí měnila ze začátku pomaleji a až poté se vyšplhala na pracovní úroveň [24, 31].

Synchronní elektromotory pak mají oproti asynchronním a stejnosměrným elektromotorům řadu výhod a proto se čím dál častěji objevují jako trakční pohony. Jednou z největších výhod je celkový menší objem, hmotnost a moment setrvačnosti, proto se dá tento typ elektromotoru zabudovat rovnou do kol. S tím také odpadá nutnost použití převodovky, protože motor je na kola napojen přímo. Celková účinnost je oproti ostatním druhům motorů vyšší, a to běžně o jednotky, výjimečně i o desítky procent. Při pohonu elektrobuse lze využít i možnost krátkodobého momentového přetížení, zejména při rozjezdech nebo jízdě do prudkého kopce. Menšími výhodami může být i rotor bez vinutí, což v kombinaci s použitím magnetů s životností několik desítek let zvyšuje spolehlivost [31, 32].

Masivnějšímu využití však stále brání i jisté nevýhody. Tou hlavní je vyšší pořizovací cena, zejména kvůli přítomnosti drahých magnetů. Další nevýhoda také souvisí s použitím magnetů. Motor musí být velmi dobře chlazen, aby jeho teplota nepřesáhla Curieův bod a magnety neztratily svou feromagnetickou schopnost. Potřeba je též hlídat možnou korozi na povrchu magnetů. Problémem i přes stále se zdokonalující konstrukci zůstávají vířivé proudy, které způsobují elektrické ztráty. Celkově jsou též synchronní motory složitější jak z hlediska konstrukce, tak technologie výroby, což souvisí hlavně s problematickými opravami [31, 32].

3.3 UMÍSTĚNÍ ELEKTROMOTORŮ

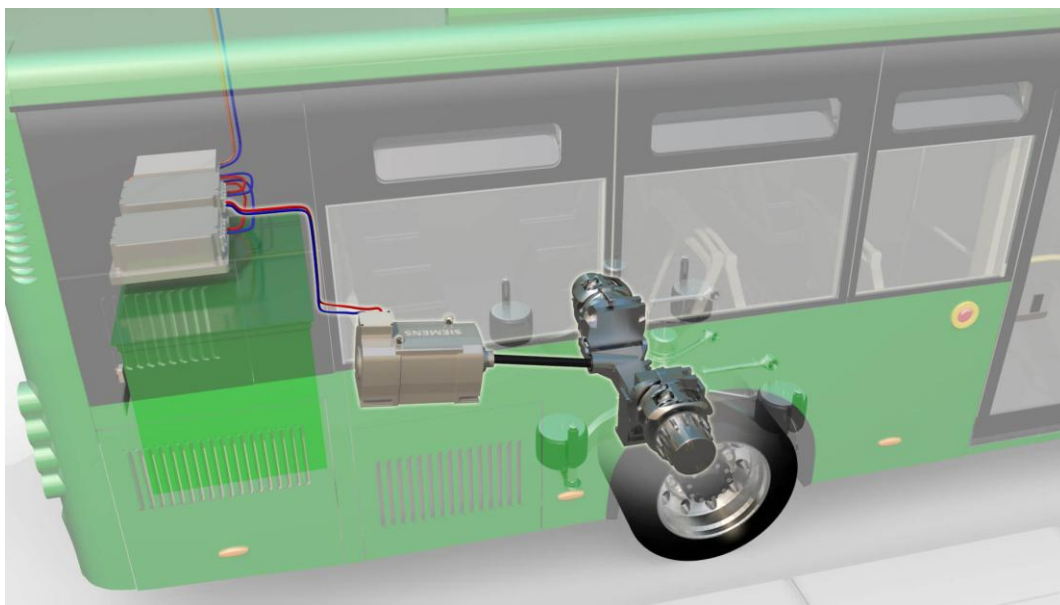
Stejně jako volba ideálních baterií a jejich vhodné kapacity, i volba elektromotoru pro pohon elektrobuse výrazně ovlivňuje jízdní vlastnosti, celkovou využitelnost a zejména cenu a pozdější ekonomičnost provozu. V předešlých podkapitolách byly zmíněny některé nejdůležitější typy elektromotorů, které by potenciálně mohly být, nebo i v minulosti byly, využívány. Když se ovšem podíváme na již vyráběné elektrobuse, zjistíme, že v současnosti jsou montovány pouze dva typy motorů, a to synchronní a asynchronní. To má i své opodstatnění. Tyto dva typy elektromotorů nabízí nejlepší vlastnosti v kombinaci s cenou. Asynchronní motory lze vidět nejčastěji jako jeden centrální motor u zadní nápravy a synchronní motor se naopak běžně umísťuje do nábojů zadních kol. Výrobci elektrických autobusů povětšinou nabízí obě dvě řešení pro své modely a je na zákazníkovi, kterou z variant si vybere. Obecně se dá říci, že řešení s centrálním elektromotorem je levnější jako mít motory v nábojích zadních kol.

3.3.1 CENTRÁLNÍ MOTOR

Tradiční řešení trakčního pohonu je mít jeden centrální motor, který přes hřídel a diferenciál pohání zadní nápravu. K tomuto řešení se přistupuje zejména kvůli snížení výrobní ceny za elektrobuse, jelikož většina výrobců s tímto řešením již má zkušenosti z běžných autobusů, a tak stačí dieselový motor nahradit elektromotorem a s ním spjatou potřebnou elektronikou. Někteří výrobci také používají stejné motory pro trolejbusy i elektrobuse (např. SOR) a tím se dále sníží celková výrobní cena. Navíc se jako centrální motor nejčastěji používá asynchronní elektromotor, který je logickou volbou zejména díky nižší ceně a velmi vysoké spolehlivosti a jednoduchosti. Nevýhodou jsou větší rozměry a hmotnost (například asynchronní motor o výkonu 160 kW výrobce TSA váží 480 kg, kdežto stejně výkonný synchronní motor Siemens váží pouhých 350 kg). Asynchronní centrální motory vyrábí z českých výrobců například Škoda nebo Pragoimex, ze světových výrobců je to pak například rakouské TSA [34, 35].

Na trhu se začínají objevovat i centrální synchronní motory a to převážně s vnějším rotorem s permanentními magnety. Toto uspořádání dává vyšší točivý moment než rotor vnitřní. Synchronní motory jsou sice o něco dražší než asynchronní a mají i menší spolehlivost, protože jsou konstrukčně náročnější, ale vynahrazují to příznivou momentovou charakteristikou a zejména lepším poměrem hmotnosti/objemu a výkonu. Synchronní motory vyrábí například firmy Siemens nebo TM4.

Centrální elektromotor se umísťuje běžně dolů do zadního převisu (*obr. 16*). Často toto řešení lze vidět v kombinaci s bateriemi v zadním převisu, kdy motor zabírá spodní část a baterie horní část převisu. Se zajímavým řešením přišla Škoda Transportation, která svůj centrální asynchronní motor umístila před zadní nápravu, a díky tomu mohla plně využít prostor zadního převisu pro baterie. Nevýhodou centrálního motoru jsou jeho rozměry a také potřeba převodovky, což způsobuje přídavné energetické ztráty, zvyšuje hmotnost vozidla a snižuje celkový dojezd. Výhodou je zejména příznivá cena a zkušenosti výrobců a servisů s tímto konstrukčním řešením.

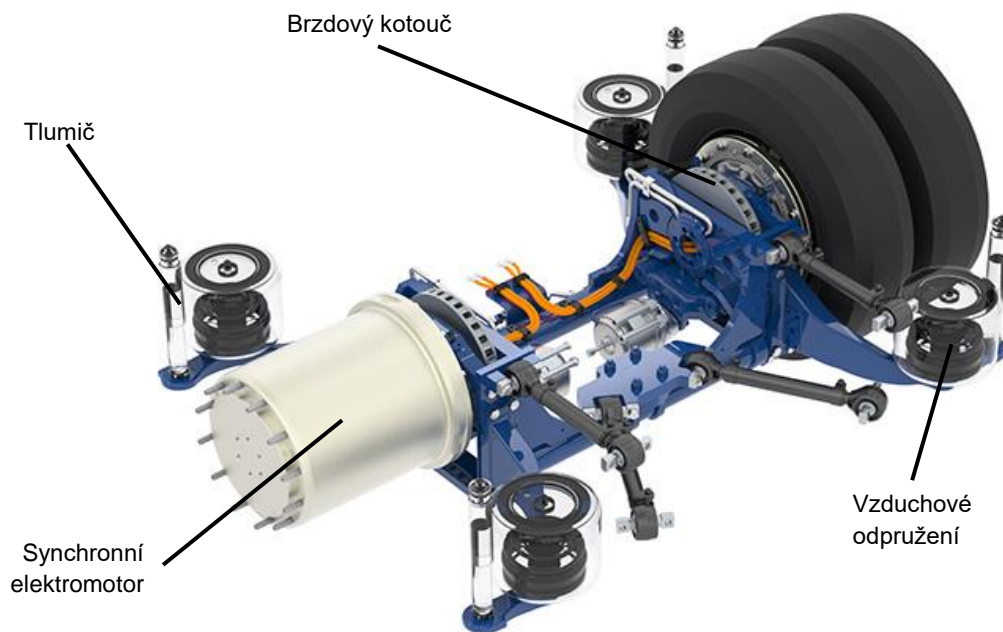


Obr. 16 - umístění centrálního synchronního motoru Siemens ve vozidle Chariot e-Bus [36]

3.3.2 MOTORY V NÁBOJÍCH KOL

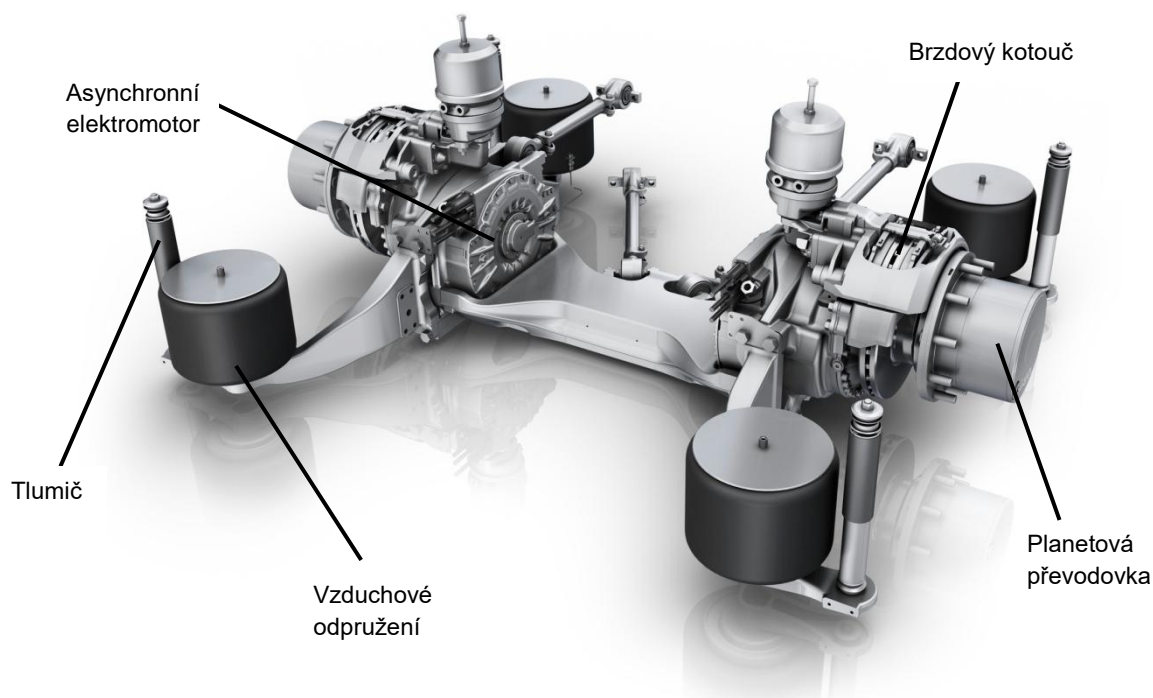
Ačkoli může tato technologie vypadat nově, objevuje se již na konci 19. století s prvními elektromobily, které toto řešení hojně využívaly. V současné době se toto konstrukční řešení opět začíná vracet. Nejprve se objevilo v elektrických automobilech a nyní už motory v kolech používá i stále více autobusových výrobců. Výrobci těchto elektromotorů ovšem nedodávají pouze samotné motory, nýbrž vždy celou zadní nápravu, která je uzpůsobena právě pro tyto účely. Hmotnost takové nápravy se pohybuje okolo 1250 kg. U autobusů nemá smysl mít poháněných více náprav (například přední i zadní). Zejména u těch městských, u kterých je průměrná rychlost velice nízká a silnice ve městech po většinu roku dobře udržované. Navíc by více poháněných náprav zbytečně zvyšovalo hmotnost a spotřebu elektrické energie.

Mít dva motory v nábojích zadních kol přináší hned několik výhod. Zaprvé je to řešení, které neubírá místo pro cestující (zachovává maximální šířku zadní uličky), popřípadě pro komponenty elektrobuse díky tomu, že elektromotory jsou přímo v kolech zadní nápravy a tím se zmenšil jejich objem ve vozidle. S tím také souvisí fakt, že kola jsou poháněna přímo a není potřeba hřídelí ani převodovek, což zvyšuje účinnost celého ústrojí (pohybující se až okolo 94 %) a zjednodušuje celkovou konstrukci. Diferenciál lze řešit elektronickou cestou, problémem je ovšem jeho vyladění a tím i řízení tažné síly na každém kole zvlášť. Jednodušší je řešení elektrodynamické brzdy, popřípadě zpětné rekuperace při brzdění vozidla. Zvýšený je celkový točivý moment a výkon elektrobuse. Zatímco centrální motory podávají standardně výkony od 120 do 200 kW, každý elektromotor v kole má běžně 120 až 150 kW, v součtu tedy 240–300 kW. Údajně by měla být snížena i hlučnost celého ústrojí. Jako nevýhody lze uvést zvýšenou neodpruženou hmotnost, kterou ale částečně řeší pneumatiky, celkově vyšší hmotnost elektrobuse (až o 550 kg) a hlavně vyšší cenu. Ta je hlavním důvodem, proč řešení s elektromotory v kolech není tak rozšířené, na rozdíl od běžného centrálního motoru [32].



Obr. 17 - Motory v nábojích kol firmy Ziehl-Abegg [37]

Hlavním druhem motoru v nábojích kol jsou synchronní motory. Ty mají oproti asynchronním nižší hmotnost i objem. Zadní nápravu se synchronními motory v nábojích kol vyrábí například firmy BYD nebo Ziehl-Abegg (obr. 17). Jedním z největších výrobců zadních náprav, ať už poháněných, nebo jen nosných, je německá společnost ZF. Ta zvolila lehce odlišnou konstrukci (obr. 18). Její řešení nemá motory integrované přímo v nábojích kol, avšak jsou umístěny na jejich ose. K pohonu používá motory asynchronní, které mají sice větší hmotnost a objem, ale jsou spolehlivější a hlavně levnější. Točivý moment přenáší na kola planetová převodovka.



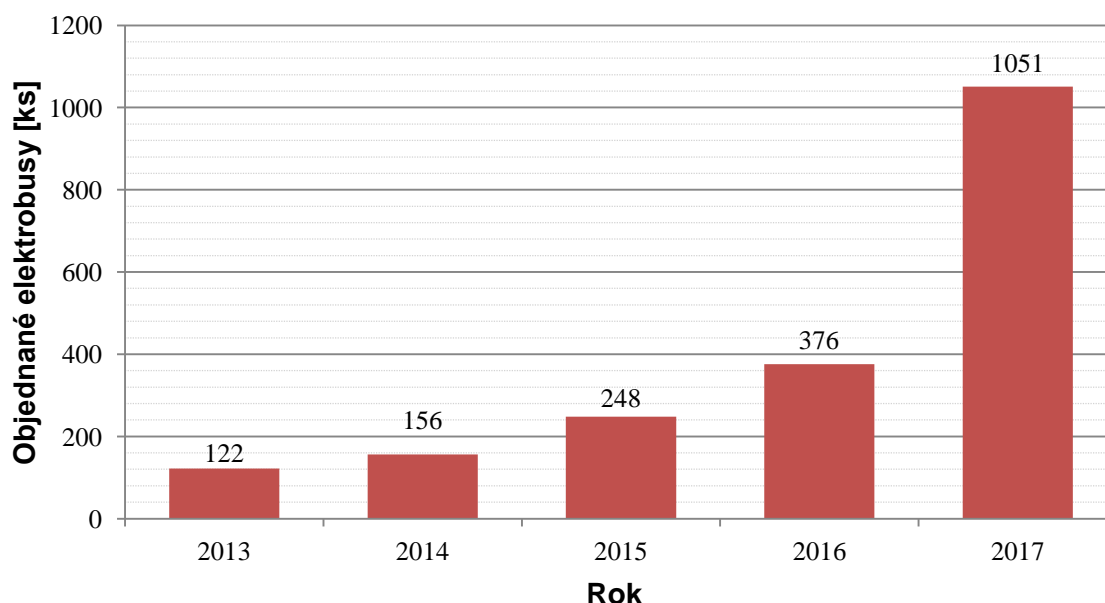
Obr. 18 - Elektrická portálová náprava ZF AVE 130 [38]

4 PŘEHLED ELEKTRICKÝCH AUTOBUSŮ NA TRHU

V posledních zhruba deseti letech se začínají elektrické autobusy více a více objevovat v provozu, a to nejen ve světě, ale postupně i v naší republice (viz *obr. 19*). Díky tomu a také díky faktu, že jsou stále ještě v platnosti nejružnější dotační pobídky pro městské podniky i soukromé dopravce, se logicky začíná rozrůstat i trh s těmito vozidly.

V současné době je ve světě několik desítek výrobců elektrických autobusů (a my můžeme být hrdí, že několik z nich se vyskytuje i v České republice), kteří reagují na potřeby trhu a zároveň se snaží výzkumem a novými konstrukčními řešeními odstranit některé „dětské nemoci“, které tuto mladou oblast trhu provází.

Kapitola začíná přehledem tuzemských výrobců elektrobuses a po nich následují někteří výrobci ze světa, u kterých se vyskytují zajímavá řešení konstrukce, nebo mají na trhu nezanedbatelný podíl.



Obr. 19 - Počet objednaných elektrobusesů ve státech EU + Švýcarsko [39]

4.1 ŠKODA TRANSPORTATION

Významný český i evropský výrobce zejména transportních strojů, jakými jsou lokomotivy, jednopodlažní a dvoupodlažní elektrické kolejové jednotky, vagony, tramvaje (šaliny⁶), soupravy metra, trolejbusy, hybridní autobusy a také právě elektrické autobusy. Mimo to produkuje též komponenty do některých ze zmíněných vozidel, zejména pohonné a řídicí systémy pro železniční a městská vozidla hromadné dopravy. U Škody je také možné si objednat modernizaci, servis a opravy vozů.

Na elektrické elektrobusesy se zaměřuje divize Škoda Electric a.s., která v současné době spolupracuje na svých elektrických autobusech s polským výrobcem autobusů Solaris, od kterého přebírá zejména karoserie [40].

⁶ Označení tramvaje v brněnském nářečí

4.1.1 ŠKODA PERUN HP

Městský dvanáctimetrový nízkopodlažní třídvéřový elektrobus (*obr. 20*) s dojezdem do 30 km (High Power). Díky vysokému výkonu při dobíjení (2x 300 kW) je schopen se znovu plně nabít za 6–8 minut. Autobus je osazen Li-ion bateriemi o vysoké hustotě energie, které mají kapacitu 78 kWh (celkem 560 článků, rozdělených do 56 modulů každý po 10 článcích), umístěnými ve třech boxech (2 v převisu za zadními koly a 1 nad pravým předním kolem). Díky tomu se redukuje hmotnost vozidla oproti klasickým autobusům, které sice mají vyšší dojezd na jedno nabití, ale musí mít také více baterií [14, 19, 41, 42].

Celý tento návrh počítá s umístěním rychlonabíjecí infrastruktury Škoda (Ultra Fast Charger) vně vozidla na konečných zastávkách městských linek, čímž se nejen efektivně využije čas strávený na těchto stanovištích, ale také v součtu umožní vyšší denní kilometrový nájezd a dále sníží hmotnost vozidla. Nabíjecí infrastruktura může být sdílena s více vozidly, což maximalizuje její využití. Systém sestává z ližin, umístěných na střeše autobusu, a nabíjecího stojanu s výsuvným ramenem, které dosedne na odhalené ližinové kontakty vozidla. Ližiny jsou mimo dobíjení schované pod krytem na střeše a vysouvá je řidič příslušným tlačítkem. Je také možné noční zásuvkové (Plug-in) nabíjení s vyvažováním (6–8 hodin) [14, 41, 42].

Technické parametry:

- Rozměry (v x š x d): 3 250 x 2 550 x 12 000 mm
- Hmotnost: 12 400 kg
- Karoserie: Solaris Urbino 12 electric
- Motor: 1x asynchronní centrální elektromotor Škoda 4ML 3444 KK/4, 160 kW
- Baterie: Li-ion LTO, 78 kWh, 2310 kg, chlazení kapalinou
- Max. rychlost: 80 km·h⁻¹
- Počet míst: 85 (27 k sezení) [19, 41]



Obr. 20 - Škoda PERUN HP [41]

4.1.2 ŠKODA PERUN HE

Typově shodný vůz s modelem HP, tento je však zaměřen na vyšší dojezd v městském provozu na jedno nabití (150–200 km) [43].

Osazen je Li-Pol bateriemi o kapacitě 222 kWh (celkem 1134 článků, rozdělených do 21 modulů každý po 18 článcích) umístěnými opět v zadním převisu a nad pravým předním nadkolím [14, 43].

Typ HE (High Energy; viz *obr. 21*) je určen pro trasy linek, které neumožňují umístění rychlodobíjecí infrastruktury nebo kde by čas na rychlodobití nebyl dostatečný. Zároveň je vhodný pro delší a náročnější trasy. Dobíjení pak probíhá zásuvkově přes noc v depu (6–8 hodin), což umožňuje i tzv. balancování jednotlivých článků na stejnou úroveň nabití. S výkonnou rychlodobíjecí infrastrukturou se pak baterie dobijí za 70 minut [14, 43].

Technické parametry:

- Rozměry (v x š x d): 3 250 x 2 550 x 12 000 mm
- Karoserie: Solaris Urbino IV
- Motor: 1x asynchronní centrální elektromotor Škoda 4ML 3444 KK/4, 160 kW
- Baterie: Li-Pol, 222 kWh, chlazení vzduchem
- Max. rychlost: 80 km·h⁻¹
- Počet míst: 82 (27 k sezení) [43]



Obr. 21 - Škoda PERUN HE [43]

4.2 SOR LIBCHAVY

Česká firma vzniklá v roce 1991 z podniku „Sdružení opravárenství a rozvoje“ (odtud zkratka SOR), v současné době vyrábějící městské a meziměstské autobusy o délkách 8 až 12,5 m a kloubové autobusy o délce 18,75 m, dále dálkové autobusy, trolejbusy a také elektrické autobusy, na kterých spolupracuje s firmou Cegelec [44, 45].

Strategie firmy je zaměřena především na nízkou výrobní cenu a ekonomicky výhodné provozní podmínky, a proto vozy této značky nachází odbyt zejména v zemích východní Evropy a Balkánu, v posledních letech ale také v Německu, Belgii nebo na Faerských ostrovech [44].

Na trhu v České republice a na Slovensku má firma zhruba 30% podíl [44].

4.2.1 SOR EBN 8/9,5/11

Vozidla designově vycházející z klasických dieselových autobusů výrobce. Jedná se o dvou- až třídvéřový (záleží na délce vozidla) nízkopodlažní autobus (*obr. 22*) s bateriemi o kapacitě 172 kWh (180 Li-ion článků) umístěnými v převisu za zadními koly. Přibližná váha trakčních baterií by měla být 1,8 tun. Vhodný zejména pro městský a meziměstský provoz a také pro přepravu cestujících v přírodních oblastech, kde je znečištění zplodinami spalovacích motorů nežádoucí [19, 45].

Vyrábí se v několika délkových verzích (8/9,5/11 m) a v několika koncepcích nabíjení. Lze objednat klasický elektrobuses s pomalým nočním dobíjením (doba nabíjení je cca 8 hodin) a s celkovým dojezdem pohybujícím se v závislosti na délce autobusu v rozmezí 150–250 km. Dalším typem je elektrobuses EBN 11, u kterého je možné průběžné dobíjení z tramvajové nebo trolejbusové sítě pomocí pantografu umístěného na střeše vozu. Dále je možné elektrobuses nabíjet z automatického nabíjecího stojanu anebo klasicky přes noc v depu. Konstrukčně vychází z typu EBN 10,5 prodloužením zadního převisu na maximální délku. Díky průběžnému nabíjení je zatím na zkušební trati v Praze schopen denně ujet až 340 km [45].

Technické parametry:

- Rozměry (v x š x d): 2 920 x 2 525 x 8 000 mm (EBN 8)
9 790 mm (EBN 9,5)
11 100 mm (EBN 11)
- Hmotnost: 8 600–9 150 kg (EBN 8)
9 050–9 650 kg (EBN 9,5)
9 700–10 500 kg (EBN 11)
- Motor: 1x asynchronní centrální elektromotor Pragoimex, 120 kW, 968 Nm
- Baterie: Li-ion, 172 kWh, chlazení kapalinou
- Max. rychlost: 80 km·h⁻¹
- Počet míst: až 93 (až 33 k sezení) [45, 46]



Obr. 22 - SOR EBN 11 [47]

4.2.2 SOR NS 12 ELECTRIC

Nově vyvinutý celonízkopodlažní dvanáctimetrový městský elektrobus představený v roce 2016 (obr. 23). Možnost variabilního uspořádání sedadel a různá kombinace počtu vstupních dveří činí tento vůz zajímavou volbou pro dopravní podniky, které si u výrobce mohou naspecifikovat vybavení přesně podle typu linky, na které budou stroj provozovat [48].

Elektrobus je vybaven několika kamerami, včetně jedné, která řidiči umožňuje pohled na střešní pantograf. Tím se autobus může dobíjet z dobíjecí stanice jak rychle, tak pomalu (maximální doba nabití by měla být 8 hodin). Design je oproti předchůdcům zcela nový a z toho také vychází umístění baterií. Ty jsou nyní uloženy podélně v prostoru střechy, a nezabírají tak prostor pro cestující. Celková kapacita činí 225 kWh a elektrobus s ní dokáže urazit až 200 km [48, 49, 50].

Technické parametry:

- Rozměry (v x š x d): 3 150 x 2 550 x 12 000 mm
- Motor: 1x asynchronní centrální elektromotor Pragoimex, 160 kW
- Baterie: Li-ion 18 650 NMC, 225 kWh
- Max. rychlost: 80 km·h⁻¹
- Počet míst: 105 (33 k sezení) [49]



Obr. 23 - SOR NS 12 electric [49]

4.3 EKOVA ELECTRIC

Dceřiná společnost Dopravního podniku Ostrava a.s. vznikla v roce 2011. Firma zúročila mnohaleté zkušenosti s montáží, modernizacemi a servisem elektrických dopravních prostředků, zejména tramvají, trolejbusů a elektrobusů, ale také příměstských vlaků, a v roce 2015 postavila svůj vlastní elektrobus, ve kterém se projeví firemní know-how.

V současné době jezdí tyto elektrobusy například v Německu nebo Švédsku, avšak v roce 2017 firma neprodala jediný autobus a spekuluje se o tom, zda je možné, aby se EKOVA se svým skromným rozpočtem (oproti jiným velkým výrobcům) dlouhodobě udržela na tomto čím dál zaplněnějším trhu [51, 52].

4.3.1 EKOVA ELECTRON

Jedná se o dvanáctimetrový nízkopodlažní elektrobus (obr. 24). Zvláštností tohoto vozu je jeho modularita, kde si zákazník poskládá vůz přesně podle svých potřeb, od baterií, přes typ a počet dveří, oken, sedadel až po pohon. Ten je také zvláštností a v České republice EKOVA nabízí jako jediný český výrobce pohon s dvojicí synchronních motorů umístěných v nábojích kol. Jedná se o technologii ZAwheel SM 530 od německého výrobce Ziehl-Abegg. Pro zákazníky, kteří by tuto technologii nevyžadovali, je připraven i klasický centrální synchronní motor kanadské firmy TM4 řady SUMO HD [52, 53, 54, 55].

EKOVA nabízí v současné době dva typy elektrobusů. První je určen pro delší dojezd, baterie (Li-ion) jsou na vozidle umístěny v zadním převisu a na střeše s celkovou kapacitou 190 kWh nebo 265 kWh. Druhý, určený pro kratší trasy do 30 km, má baterie umístěné stejně, avšak pouze s nominální kapacitou 2 x 43 kWh a určen je pro průběžné ultrarychlé dobíjení na konečných zastávkách (6 minut) [52, 53].

Ostravská společnost nabízí pro typ vozidel s kratším dojezdem možnost dobítí pomocí ultrarychlého nabíjení ve standardu OppCharge (systém střešních ližin a externího

pantografu). Ten poskytuje nabíjecí výkon až 600 kW a postupně se stává populárnějším především díky schopnosti nabít jakékoli vozidlo s odpovídajícím rozhraním, tedy nejen elektrobusey. Samozřejmě je tu také možnost pomalého nabíjení externí (Plug-in) nabíječkou s výkonem 43 kW [52, 53].

Technické parametry:

- Rozměry (v x š x d): 3 270 x 2 550 x 11 980 mm
- Hmotnost: 18 000 kg
- Motor: 1x synchronní centrální elektromotor TM4 SUMO HD HV3400, 195 kW
2x synchronní elektromotor Ziehl-Abegg v nábojích zadních kol, 2x 113 kW
- Baterie: Li-ion, 190 nebo 265 kWh
Li-ion LTO, 2x 43 kWh
- Max. rychlost: 80 km·h⁻¹
- Počet míst: 80–90 (26–30 k sezení) [52, 53, 55]



Obr. 24 - EKOVA Electron [52]

4.4 SOLARIS BUS & COACH

Polský výrobce městských a meziměstských autobusů a elektrobuseů (Solaris Urbino), trolejbusů (Solaris Trollino) a tramvají (Solaris Tramino), jeden z největších na evropském trhu. Sídli v Bolechowě u Poznaň. První autobus vlastní konstrukce firma představila v roce 1999, předtím vyráběla pouze autobusy značky Neoplan [56].

K 1. 7. 2018 jezdí autobusy Solaris ve 32 zemích světa, z toho velká část v samotném Polsku a okolních státech. Elektrické autobusy zatím nalezneme pouze v 9 zemích Evropy, najely však už více jak 9 milionů km [56, 58].

4.4.1 SOLARIS URBINO ELECTRIC 8,9 LE/12/18

Moderní, nízkopodlažní, dvou- až čtyřdveřový elektrobus, vyrábějící se v délkách 8,9/12/18 m. Na výběr je z mnoha kapacit Li-ion baterií podle toho, na jaké trase bude elektrický autobus operovat. Pohybují se od 80 kWh do 240 kWh. Pokud se jedná o verzi s 240 kWh, jsou baterie rozděleny do šesti samostatných modulů, každý po 40 kWh. Tři moduly jsou umístěné v zadním převisu, zbylé dva pak na střeše. Díky tomu je autobus schopen urazit na jedno nabití okolo 150 km [59, 60].

Pro pohon je u modelu Urbino 8,9 LE použit centrální asynchronní motor TSA o výkonu 160 kW, větší model Urbino 12 (*obr. 25*) je možné pořídit buď se stejným motorem, nebo s poháněnou zadní nápravou ZF AVE 130. Kloubový elektrobus Urbino 18 může být vybaven také touto zadní poháněnou nápravou, nebo jedním centrálním asynchronním motorem TSA o výkonu 240 kW [5, 58, 59].

K dobíjení baterií slouží opět základní dva způsoby. První je pomocí pantografu firmy Schunk, který je za jízdy složen na střeše a po příjezdu pod dobíjecí stojan se zvedne a proběhne nabíjení vysokými výkony. Druhý je pomalý (noční), kdy se v depu do autobusu zapojí plug-in nabíječka menších výkonů a nabíjení tak trvá několik hodin [39, 57, 58].

V roce 2017 vyhrál Solaris Urbino 12 electric titul International Bus of the Year 2017 [58].

Technické parametry:

- Rozměry (v x š x d): 3 400 x 2 400 x 8 950 mm (Urbino 8,9 LE electric)
3 300 x 2 550 x 12 000 mm (Urbino 12 electric)
3 300 x 2 550 x 18 000 mm (Urbino 18 electric)
- Motor: 1x asynchronní centrální elektromotor TSA TMF 35, 160/240 kW
2x asynchronní elektromotor v zadní nápravě ZF AVE 130, 2x 110 kW
- Baterie: Li-ion NMC, 80–240 kWh
- Počet míst k sezení: 24–47 (v závislosti na velikosti vozidla) [58, 59]



Obr. 25 - Solaris Urbino 12 electric [59]

4.5 CHARIOT MOTORS

V České republice zřejmě téměř neznámý bulharsko-izraelský výrobce elektrických autobusů a také infrastruktury pro jejich dobíjení. Společnost byla založena v roce 2009 a od té doby spolupracuje s čínským výrobcem autobusů Higer, který dodává své karoserie. Výlučnost Chariot Motors je v tom, že místo baterií používá k uskladnění elektrické energie tzv. superkapacitory [60].

Do nynějška jezdí elektrobusy Chariot v šesti zemích (Izrael, Bulharsko, Rumunsko, Srbsko, Itálie a Rakousko) a připravuje se vstup na trh do Polska. Nutno však podotknout, že ve všech zmíněných zemích kromě Izraele operuje vždy jen pár těchto autobusů (maximum je pět elektrobusů a to v Bělehradě) a ty jsou stále brány spíše jako testovací. Největší úspěch slaví elektrobusy Chariot v Tel Avivu, kde jich po dobrých zkušenostech jezdí již 26 a do konce roku 2019 by jich mělo přibýt dalších 100. Výsledky testů výrobce tak zatím ukazují, že technologie superkapacitorů je uplatnitelná a konkurenceschopná s ostatními druhy ať už elektrických, tak i běžných autobusů [60, 61].

4.5.1 CHARIOT E-BUS

Nízkopodlažní dvanáctimetrový dvou- až třídvěřový (podle zvolené karoserie) elektrobus (*obr. 26*). Jak již bylo zmíněno výše, stroj využívá technologie superkapacitorů, vyráběných firmou Aowei. Ty jsou umístěny v zadním převisu, váží 950–1350 kg, a mají kapacitu uzpůsobenou přesně na míru linky, na které budou operovat (běžně mezi 20 a 40 kWh). Kvůli této malé kapacitě bývají autobusy nasazovány na kratší linky (< 30 km), kde se průběžně dobíjí na konečných stanicích pomocí rychlodobíjecí infrastruktury (koncepte výsuvného pantografu na střeše elektrobusu a ližin umístěných na nabíjecím místě). Zkušenosti zejména z Bělehradu a Tel Avivu ukazují, že k ujetí 15 km při spotřebě energie přibližně 1,1 kWh/km stačí nabíjecí čas 2–5 minut. Stroje jsou tak schopné jezdit téměř nepřetržitě. Například v Bělehradu je obvyklá denní suma času v provozu 19 hodin [36, 60, 61].

Firma si vyrábí i právě zmíněnou dobíjecí infrastrukturu a prosazuje koncept, kdy jedna dobíjecí stanice bude sloužit více typům elektrobusů. Ty budou mít pouze shodný typ nabíjecího systému. Síť těchto dobíjecích míst pak bude mít na starost operátor monitorující provoz online a vycházející z dat, které mu jednotlivé autobusy budou během jízdy odesílat (včetně aktuální polohy, plynulosti jízdy, počtu cestujících, přístrojů spotřebovávajících energii, nebo i veškerých závad) [60].

O pohon se stará buď centrální synchronní motor Siemens, nebo dva asynchronní elektromotory u kol v zadní nápravě ZF AVE 130 [36, 62].

Technické parametry:

- Rozměry (v x š x d): 3 680 x 2 550 x 12 000 mm
- Hmotnost: 12 540 kg
- Motor: 1x synchronní centrální elektromotor Siemens ELFA2, 140 kW, 891 Nm
2x asynchronní elektromotor v zadní nápravě ZF AVE 130, 2x 125 kW
- Superkapacitory: Aowei MUCK585V92000, 20/32/40 kWh, 950–1350 kg
- Max. rychlost: 70 km·h⁻¹
- Počet míst: 80 (27 k sezení) [36, 62]



Obr. 26 - Chariot e-Bus [61]

4.6 NFI

Největší výrobce autobusů v Severní Americe, založený v kanadském Winnipegu již v roce 1930. Od té doby firma New Flyer (NFI je zkratkou New Flyer Industry) rozšířila svou výrobu i do USA a je nejen výrobcem samotných autobusů, ale také výrobcem některých komponent, které distribuuje ostatním výrobcům. Celkem je součástí NFI Group 32 výrobních a inovačních center v USA a Kanadě, zaměstnávajících téměř 6 000 pracovníků. V současnosti společnost spravuje podle svých dat zhruba 41 000 autobusů (včetně autobusů firem NABI a Orion, patřících pod NFI Group), 7300 jich je bateriových a z nich více jak 1 600 je plně bezemisních (vodíkových a elektrických). Velikost této firmy podtrhuje i fakt, že na severoamerickém trhu má 45% podíl všech autobusů [63, 64].

4.6.1 NEW FLYER XCELSIOR CHARGE 35'/40'/60'

Nízkopodlažní dvou až pětidveřový městský elektrobús (obr. 27). Řada Xcelsior byla poprvé odhalena v roce 2008 a od roku 2017 je možné ji mít i s plně elektrickým pohonem. K dostání je ve třech délkových variantách 35/40/60 stop⁷ (11,67/12,19/18,29 m). Zvláštností těchto amerických autobusů jsou velké kapacity Li-ion baterií, které vyrábí společnosti XALT Energy nebo A123 Systems (ta má jednu ze svých 6 poboček i v České republice). U nejmenšího modelu 35' rozmezí 100–454 kWh u největšího modelu 60' 250–818 kWh. Díky tomu jsou elektrobusesy schopny urazit na jedno nabití až 275 mil⁸ (442 km, model 60' s maximální kapacitou baterií). Umístění akumulátorů je různé, v závislosti na maximálním využití prostoru, avšak vždy jde o prostory zadního převisu a střechy. O pohon se stará buď centrální synchronní motor Siemens ELFA2, u kloubového modelu 60' je pak i možnost mít zadní poháněnou nápravu s elektromotory na osách zadních kol firmy ZF. Nabíjení elektrických autobusů New Flyer Xcelsior CHARGE může probíhat klasicky pomalejším plug-in systémem, nebo rychlejší variantou, tedy pantograf a nabíjecí stanice na koncových zastávkách [65, 66].

⁷ 1 stopa = 0,3048 m

⁸ 1 míle = 1,609 344 km

Technické parametry:

- Rozměry (v x š x d): 3 300 x 2 600 x 11 050 mm (Xcelsior CHARGE 35')
12 500 mm (Xcelsior CHARGE 40')
18 540 mm (Xcelsior CHARGE 60')
- Motor: 1x synchronní centrální elektromotor Siemens ELFA2, 160–200 kW
2x asynchronní elektromotor v zadní nápravě ZF AVE 130, 2x 125 kW
- Baterie: Li-ion, 100–818 kWh, chlazení kapalinou
- Počet míst: 67–118 (32–50 k sezení) [65, 66]



Obr. 27 - New Flyer Xcelsior CHARGE 40' [66]

4.7 BYD

Čínský výrobce automobilů, elektromobilů, hybridních automobilů, elektrických autobusů, nákladních automobilů, vysokozdvížných vozíků, elektrokol, baterií a dalších elektronických zařízení. Hlavní sídlo leží ve městě Šen-čen, kde firma v roce 1995 vznikla. Dělí se na dvě hlavní frakce, a to BYD Automobile a BYD Electronic. Většina komponent je samotnou firmou vyráběno, avšak objevují se problémy s autorskými právy, kvůli kterým je v současné době vedeno několik patentových sporů. V roce 2010 byla společnost týdeníkem Bloomberg Businessweek zařazena mezi 100 nejrychleji rostoucích technologických firem světa. V současné době je podle svých údajů již třetím rokem největším výrobcem elektrických vozidel na světě. V roce 2017 bylo prodáno okolo 113 000 elektrických aut a po celém světě jezdí více než 40 000 elektrických autobusů vyráběných firmou BYD [67, 68].

4.7.1 BYD C6/C9/C10

Jedná se zatím o zcela unikátní elektrické autobusy pro dálkové cestování, tedy ne pro městský provoz jako nabízí ostatní výrobci. Představeny byly na veletrhu dálkových autobusů v New Orleans roku 2015 a od té doby se pomalu začínají dostávat do flotil autobusových dopravců. Například společnost Flixbus nasadila v minulém roce elektrobuses BYD C9 na

testovací (110 km dlouhé) lince mezi Frankfurtem a Mannheimem, s nabíjecími stanicemi na obou konečných zastávkách. Firma BYD je v současnosti téměř jediná na trhu, která podobný koncept elektrobuse nabízí. K dostání jsou tři verze v délkách 23/40/45 stop (7/12,2/13,7 m), přičemž nejdelší verze je třínápravová. Pohon je zajištěn dvěma elektromotory v nábojích zadních kol (2x 150/180 kW) a energie je uložena v lithium-železo-fosfátových (Li-ion LFP) bateriích vlastní výroby. Kapacita se liší podle modelu, nejkratší C6 disponuje kapacitou 121 kWh (dojezd až 124 mil/200 km), střední varianta C9 je osazena akumulátory o kapacitě 352 kWh (dojezd až 200 mil/322 km) a nejdelší varianta C10 (*obr. 28*) má kapacitu 446 kWh (dojezd až 230 mil/370 km). Čas dobíjení se pohybuje v rozmezí 2–5 hodin v závislosti na kapacitě baterií a velikosti nabíjecího výkonu [69, 70, 71, 72, 73].

Technické parametry:

- Rozměry (v x š x d): 2 743 x 2 060 x 7 163 mm (BYD C6)
3 541 x 2 591 x 12 344 mm (BYD C9)
3 541 x 2 581 x 13 960 mm (BYD C10)
- Hmotnost: 6 250/16 500/19 500 kg
- Motor: 2x synchronní elektromotor BYD v nábojích zadních kol, 2x 150/180 kW
- Baterie: Li-ion LFP, 121–446 kWh
- Max. rychlost: 100–105 km·h⁻¹
- Počet míst: 16–57 k sezení [71, 72, 73]



Obr. 28 - BYD C10 [73]

5 AKTUÁLNÍ VÝVOJ

Trh s elektrickými autobusy je stále velice mladá kategorie. Proto stále probíhá překotný vývoj, zlepšování a přichází nové nápady. V současné době jsou velkými tématy zejména standardizace rozhraní vozidlo-dobíjecí infrastruktura a optimalizace konkrétních elektrobuses na konkrétní linky. Řeší se také vývoj nových baterií a superkapacitorů, zlepšování elektromotorů a v neposlední řadě také celkový provoz elektrobuses (tzv. elektrobuses jako služba). Zajímavým konceptem se také stávají autonomní elektrické minibusy.

5.1 STANDARDIZACE NABÍJENÍ

Tak jako jsou čerpací stanice běžných pohonných hmot unifikované a s autem od jakéhokoli výrobce natankujete běžně u každé čerpací stanice, u elektrobuses toto stále chybí. Praxí je, že výrobce autobusů si dobíjecí stanici pro své vozy buď vyrábí zcela sám, tudíž u jiných stanic není možné dobíjení, anebo pro něj nabíjecí infrastrukturu vyrábí jedna z mnoha firem, z nichž každá má opět své řešení. V budoucnu by tato neunifikace mohla znamenat velký problém, jelikož by dopravní podniky s nákupem elektrobuses od jiného výrobce musely stavět nové nabíjecí stanice, a to jak na konečných zastávkách, tak popřípadě ve svých depech.

Zatím se zdá, že by se standardem, minimálně pro Evropu, mohlo stát čtyřpólové (uzemněné) nabíjení ze stanic s otevřeným rozhraním OppCharge. Jedním z velkých výrobců takovéto infrastruktury je například firma ABB. Prvním klíčovým krokem k rozšíření standardu OppCharge se stala dohoda z 15. března 2016 mezi výrobcí Irizar, VDL, Solaris a Volvo, kteří se domluvili na otevřeném a průhledném přístupu ke svým konstrukcím vozidlo-dobíjecí infrastruktura. Součástí dohody také bylo, na jakém principu budou tyto stanice fungovat. V případě rychlonabíjecího typu se tedy jedná o kontakt dvou ližin na střeše vozidla (celková hmotnost je přibližně 15 kg) a nabíjecího výklopného ramene (pantografu) z nabíjecí stanice (obr. 29). Pod takovou stanicí by vozidlo podporující standard OppCharge zastavilo, rameno by se automaticky připojilo a proběhlo by rychlé dobíjení v řádu minut. Komunikace a navedení řidiče pod pantograf by probíhalo přes Wi-Fi. Výhodou je, že vozidlo veze pouze ližiny, čímž se ušetří převážená hmotnost a sníží vibrace, které by mohly nastat v případě převozu pantografu. Jednoduchost celého systému pak přispívá k celkové vysoké spolehlivosti. V případě nabíjení přes noc v depu plug-in nabíječkou pak byl ustanoven pro komunikaci vozidla a nabíjecí infrastruktury standard Combo2 [74, 75].



Obr. 29 - Schéma rychlonabíjecí stanice standardu OppCharge [74]

Stanice se standardem OppCharge již byly úspěšně testovány v několika zemích, například ve Švédsku, Belgii, Lucembursku, nebo Německu. V Evropě se celkově počítá se vznikem norem pro nabíjení elektrobuseů v průběhu roku 2019, celosvětové normy by mohly být hotové někdy v roce 2020 [75].

5.2 OPTIMALIZACE ELEKTROBUSŮ NA LINKU

Se stále poměrně velkou vahou baterií se hledají způsoby, jak elektrobuse celkově odlehčit, zároveň ale zachovat optimální dojezd. Sestavení vybavení vozu přímo na konkrétní linku, na kterou bude během své služby nasazen, se zdá být možným řešením. Kapacita baterií je tedy napočítána tak, aby autobus zvládl ujet celou svou určenou trasu a na konečné stanici se rychlonabíjecí infrastrukturou opět za pár minut nabil a byl schopen další jízdy. Tímto způsobem by se snížila hmotnost baterií, jelikož by jich ve voze byl pouze ideální minimální počet. Problémem je, že kapacita baterií je za různých provozních podmínek proměnná a s postupem času celkově klesá. Výpočet ideální kapacity a s tím spjatý počet baterií je tedy velice problematický. Elektrobuse je také prakticky odsouzen jezdit stále stejnou trasu a v případě změny/zrušení linky by mohlo být obtížné autobus zařadit na jinou trasu, popřípadě by optimalizace mohla přijít vniveč.

5.3 ELEKTROBUS JAKO SLUŽBA

Provoz elektrobuseů nelze vnímat jen jako pouhé vozidlo. Na rozdíl od klasického autobusu je provoz nutno brát jako ucelený systém typu vozidlo-nabíjecí infrastruktura-servis. Celkový obchodní model je pro dopravní podniky zatím velká neznámá, hlavně kvůli tomu, že elektrobusey jsou stále relativní novinkou na trhu. Zajímavou možností, jak elektrobusey provozovat, je model švédského města Uddevalla. Zde se rozhodli pro zakoupení čtyř elektrobuseů Volvo 7900 Electric, kde provozovatelem budou tamní dopravci, avšak Volvo jako výrobce bude zodpovídat za kompletní údržbu a servis. Za tyto služby budou dopravci Volvu pravidelně platit a mají jistotu, že vozidla budou v nejlepší možné kondici. Pro Volvo se naopak jedná o další přivýdělek. Nabíjení v tomto případě bude probíhat pouze v depu, nebude tedy třeba stavby rychlonabíjecích stanic [76].

5.4 AUTONOMNÍ ELEKTRICKÉ MINIBUSY

Autonomní elektrické minibusy jsou projekt, který by měl do budoucna zavést jakýsi „třetí druh dopravy“, tedy něco mezi klasickou páteří hromadnou dopravou a individuální automobilovou dopravou. Pomalu se takováto vozítka začínají objevovat v nejrůznějších městech Evropy, zatím především na krátkých testovacích tratích, často i zcela mimo běžný provoz, kde si výrobci zkoušejí funkčnost a spolehlivost autonomního řízení. Do budoucna se pak počítá s celými flotilami autonomních elektrických minibusů, které by se městy pohybovaly. Pořád by ovšem nad nimi měl kontrolu dispečer, a ten by ze svého pracoviště na provoz dohlížel a řešil případné problémy [77].

Tento druh dopravy je určen zejména pro města, která mívají časté problémy se smogovými situacemi. Při hojnějším nasazení a při využívání cestujícími by díky svému bezemisnímu provozu mohly pomoci takovéto situace alespoň částečně zmírnit. Dalším důvodem, proč jsou tyto vozy zkoušeny, je stárnutí městské populace. Staří lidé s omezenějšími pohybovými schopnostmi by měli možnost využívat tento druh dopravy hlavně na „poslední kilometr“, který v tomto případě představuje trasu mezi konečnou stanicí hromadné dopravy a jejich domovy, popřípadě nákupními a průmyslovými středisky, do jejichž naprosté blízkosti větší autobusy často nezajíždí. Svou využitelnost by si autonomní elektrické minibusy našly

i v historických centrech měst. Zde by byly určeny k přepravě turistů okolo památek a dalších význačných lokalit. Ve spojení s nadstandardní manévrovatelností, malými rozměry a tichým a bezemisním provozem by tak nebyly výrazným rušivým elementem. Jako další možnosti využití lze uvést například provoz v blízkosti studijních kampusů nebo na letištích. Konkrétní využití by ovšem záleželo na potřebách jednotlivých měst, zde nastíněné návrhy jsou pouze jedněmi z mnoha a jistě by se našly další. Zajímavostí bude nasazení několika autonomních elektrických minibusů do provozu během LOH 2020 v Tokiu [78, 79].

Elektrická autonomní vozítka využívají nové technologie v oblasti samořízení, jsou osazeny množstvím senzorů a kamer a jsou schopny reagovat na nejrůznější situace v provozu. V případě potřeby jsou schopny nouzového brzdění, vyhýbání překážkám a podobně. Problém, jak naladit řídicí software tak, aby na druhou stranu nebyl až přespříliš opatrný a nebrzdil například tehdy, když někdo před vozítko pouze natáhne ruku, je věc, kterou se výrobci také na svých zkušebních tratích intenzivně zabývají. Do výroby autonomních elektrických minibusů se pustili zejména francouzští výrobci, například EasyMile s modelem EZ10 (obr. 30) nebo Navya a jejich model Autonom Shuttle [78].



Obr. 30 - EasyMile EZ10 [80]

Autonomní elektrická vozítka se do provozu uvádí hlavně v Evropě. Zde je na testovacích tratích nalezneme například v Paříži, německém lázeňském městečku Bad Birnbach, ve švýcarském Sionu, ve Vídni, v Helsinkách a o zařazení do provozu uvažuje i Praha. Mimo Evropu je možné zmínit testování v kanadském Candiacu, australském Melbourne, v Japonsku, Číně, nebo i USA. Nutno však dodat, že vzhledem k velmi vysoké ceně autonomních minibusů (přibližně 250 000 dolarů/5 660 000 Kč⁹ za kus), se u spousty měst jedná spíše o snahu zviditelnit se a reálné využití v provozu jde stranou. Ve městech, kde by takováto vozítka uplatnění našla, je ale třeba dávat pozor na fakt, aby nezpůsobila to, čemu měla pomoci, a to jsou zácpy. S přílišným využíváním by se totiž lehce mohlo stát, že autonomních minibusů bude na určité trase tolik, že svou pomalou jízdou budou způsobovat dopravní zácpy, kterým ovšem měly naopak odlehčit [79].

⁹ 1 dolar = 22,6285 Kč, údaj platný k 17. 3. 2019

5.4.1 NAVYA AUTONOM SHUTTLE

Francouzský výrobce Navya je velkým průkopníkem v oblasti autonomních elektrických vozidel. Mimo svůj minibus má v nabídce i autonomní taxi. Na trhu se pohybuje zhruba 4 roky a za tu dobu nasadil do testovacích provozů již několik desítek autonomních minibusů po celém světě.

Autonom Shuttle (*obr. 31*) je nízkopodlažní vozítko pro 15 cestujících (z toho 11 sedících). Těm slouží k nástupu a výstupu jedny velké boční dveře a pro potřeby vozíčkářů či maminek s kočárkem je vybaveno výsuvnou najížděcí rampou. Délka činí 4,75 m, výška 2,65 m a šířka pouhých 2,11 m. I přes fakt, že je velká část konstrukce plastová, celková váha prázdného minibusu činí 2 400 kg. Vozidlo je osazeno Li-ion (LFP) bateriemi o celkové kapacitě 33 kWh, díky čemuž vydrží v provozu až 9 hodin. Baterie se pak dobíjí plug-in nabíječkou a 90% kapacity dosáhnou nabíjením nejrychleji za 4 hodiny. Minibus pohání asynchronní elektromotor o výkonu 15 kW a vůz je s ním schopen dosáhnout maximální rychlosti $45 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, avšak provozní rychlost se pohybuje pouze okolo $25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Zajímavostí pak je, že zatáčet mohou všechna čtyři kola, čímž se snížil poloměr otáčení na 4,5 m. O komfort cestujících v prosklené kabině se stará automatická klimatizace, v zimních obdobích pak i topení. Uvnitř lze nalézt také několik obrazovek, které přenáší 360° obraz z kamer monitorující okolí vozidla. Okolí vozu je nepřetržitě snímáno i osmi Lidary¹⁰, několika předními a zadními kamerami a naváděno je pomocí navigačního systému GPS [81].



Obr. 31 - Navya Autonom Shuttle [82]

¹⁰ Lidar (z anglického Light Detection And Ranging) je technologie na snímání vzdálenosti pomocí laserového paprsku odraženého od okolních objektů.

6 UKÁZKA VÝPOČTU KAPACITY BATERIÍ

Následující kapitola se bude zabývat přibližným výpočtem potřebné kapacity baterií, která je třeba k ujetí určité trasy. K tomuto výpočtu je potřebné nejdříve znát síly jednotlivých jízdních odporů, které na elektrobus při jízdě působí, a které musí překonávat tažnou silou motoru. Konkrétně se jedná o tyto čtyři: valivý odpor O_f , odpor vzduchu O_v , odpor svahu O_s a dynamický odpor O_d . Pokud součet těchto sil vynásobíme dráhou, na které působí, dostaneme práci A_{celk} . Práci [J] lze následně převést na výslednou energii baterií [kWh].

Výsledná hnací síla motoru:

$$F = O_f + O_v + O_s + O_d \text{ [N]} \quad (7)$$

Nejprve je nutné si stanovit vstupní parametry. Za ukázkové vozidlo jsem si zvolil elektrobus EKOVA Electron s celkovou prázdnou hmotností 12 580 kg a maximální přípustnou hmotností 18 000 kg. Při maximální kapacitě 90 lidí tak vychází průměrná hmotnost jednoho přepravovaného na 60 kg. Čelní plocha elektrobusu je vypočítána z výrobcem uváděných rozměrů. Součinitel vzhledem k tvaru čelní plochy (téměř dokonale rovná bez zaoblených rohů) byl zvolen na hodnotu 0,88. Zrychlení při rozjezdu a brzdění jsem stanovil na hodnotu 2 m/s, což by ve skutečném provozu bylo zřejmě maximum a díky tomu se bude výpočet pohybovat „na bezpečné straně“. Maximální zvolená rychlost 14 m·s⁻¹ odpovídá v přepočtu rychlosti 50,2 km·h⁻¹.

Základní vstupy výpočtu:

Celková hmotnost elektrobusu: $M = 18\,000 \text{ kg}$

Čelní plocha elektrobusu: $S_x = 7,522 \text{ m}^2$

Součinitel vzdušného odporu: $C_x = 0,88$

Součinitel valivého odporu: $f = 0,016$

Součinitel rotačních částí: $\vartheta = 1,1$

Hustota vzduchu: $\rho = 1,24 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Gravitační zrychlení: $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

Maximální rychlost: $v = 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

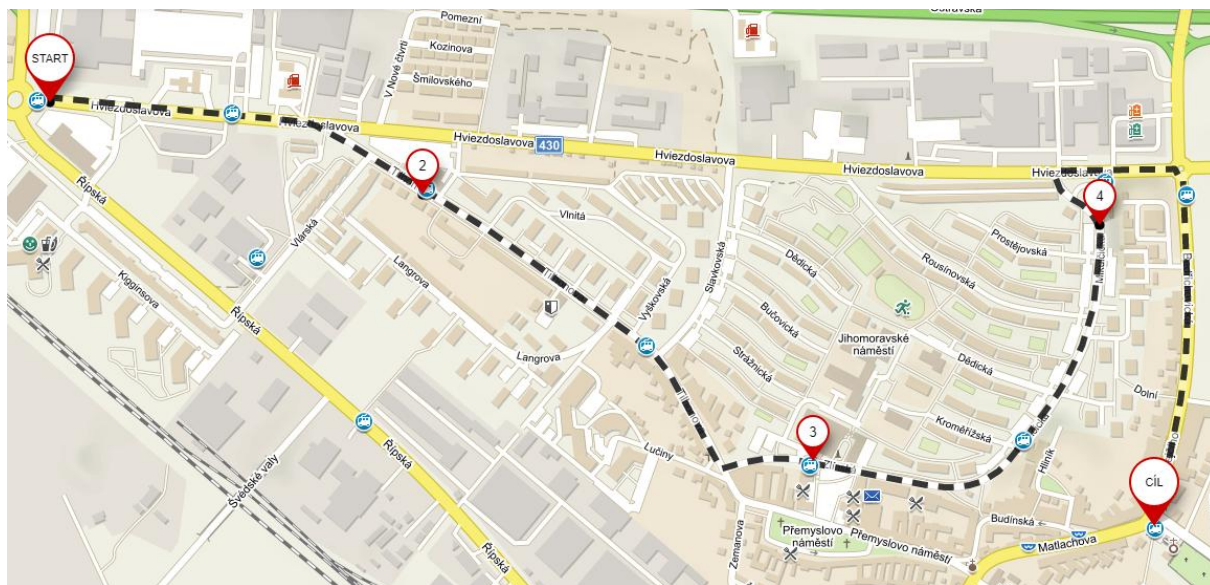
Zrychlení elektrobusu: $a = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

6.1 VÝPOČET

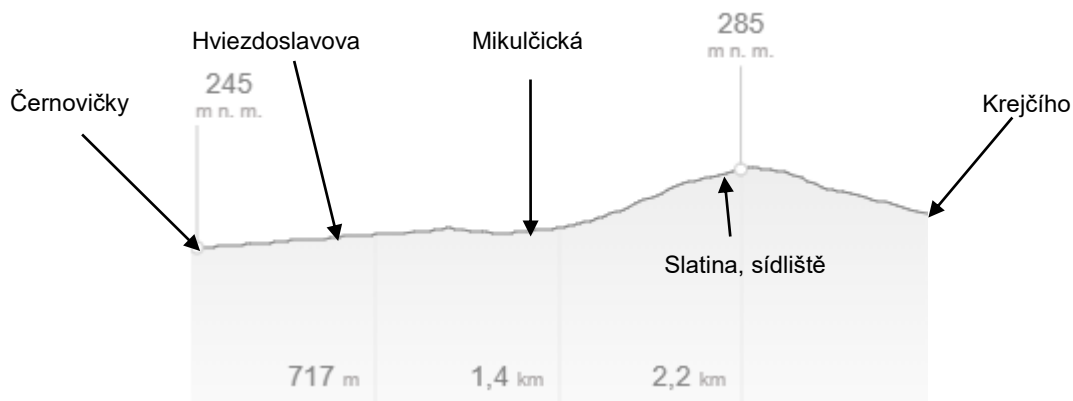
Výpočetní vztahy budou uváděny na ukázkou pro první úsek zvolené trasy, mezi první a druhou zastávkou. Vztahy platí i obecně, avšak ve výpočtu jsou uváděny s indexy, aby bylo docíleno synchronity mezi prací a výpočtem v programu Mathcad 15 (viz příloha 1).

6.1.1 ZVOLENÁ TRASA

Ukázková trasa, na které bude počítána potřebná kapacita baterií, byla zvolena v městské části Brno-Slatina a kopíruje část trasy noční linky N96. Konkrétně se jedná o úsek od zastávky Černovičky po zastávku Krejčího (viz *obr. 32*). Mezizastávky pak jsou celkem tři: Hvězdoslavova (2), Mikulčická (3) a Slatina, sídliště (4). Zhruba první polovinu trasy se elektrobus pohybuje téměř bez stoupání, následuje výjezd do kopce k předposlední zastávce a po průjezdu kruhového objezdu elektrobus klesá k poslední zastávce. Celková délka ukázkové trasy je 2 850 m a její výškový profil zobrazuje *obr. 33*.



Obr. 32 - Zvolená trasa [83]



Obr. 33 - Výškový profil zvolené trasy [83]

Trasa byla pro výpočet rozdělena do šesti úseků, ve kterých se podmínky jízdy po celé délce příliš nebo vůbec neměnily (jde zejména o úhel stoupání). Práce ze všech úseků se poté sečetly a byla získána celková práce A_{celk} . Při jízdě z kopce nebo při brzdění by ve skutečnosti docházelo k rekuperaci energie (práce by byla záporná), a tím by se celková potřebná kapacita snížila. Ovšem v tomto výpočtu bude na těchto úsecích brána práce jako nulová, což zaručí, že vypočtená kapacita bude i přes zanedbání některých dalších vlivů stále dostatečná.

Každý z úseků trasy lze rozdělit do dvou částí - rozjezd/brzdění a stálá jízda. Čas potřebný pro rozjezd/brzdění, pokud známe zrychlení a maximální rychlost, je možné vypočítat ze vztahu:

$$t_{roz1} = \frac{v}{a} = \frac{14}{2} = 7 \text{ s} \quad (8)$$

Dráhu, kterou za tento čas elektrobus ujede, vypočítává vztah:

$$x_{roz1} = \frac{a \cdot t_{roz1}^2}{2} = \frac{2 \cdot 7^2}{2} = 49 \text{ m} \quad (9)$$

6.1.2 VALIVÝ ODPOR

Valivý odpor vzniká valením pneumatiky po podložce. Pneumatiky přenáší na vozovku celou váhu autobusu, která je na rozdíl například od auta značná, a proto lze očekávat, že ve výpočtu sehraje tento odpor důležitou roli. Ovlivnit jej je možné například použitím jiného typu pneumatiky (radiální vzorek je lepší jak diagonální), velikostí pneumatik (čím větší průměr kola, tím lepší), nahuštěním pneumatik, lepším materiálem podložky a dalšími faktory. Valivý odpor také klesá se zvyšujícím se úhlem svahu [84].

Valivý odpor [85]:

$$O_{f1} = f \cdot M \cdot g \cdot \cos \alpha_1 = 0,016 \cdot 18\,000 \cdot 9,81 \cdot \cos(0,47^\circ) = 2\,824 \text{ N} \quad (10)$$

O_{f1} = valivý odpor na 1. úseku [N]
 f = součinitel valivého odporu [-]
 M = hmotnost autobusu [kg]
 g = gravitační zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]
 α_1 = úhel sklonu svahu [$^\circ$]

Pro výpočet práce valivého odporu stačí valivý odpor vynásobit dráhou.

Práce valivého odporu při rozjezdu:

$$A_{f1r} = O_{f1} \cdot x_{roz1} = 2\,824 \cdot 49 = 138\,376 \text{ J} \quad (11)$$

A_{f1r} = práce valivého odporu při rozjezdu na 1. úseku [J]
 x_{roz1} = dráha pro rozjezd z 0 na $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [m]

Práce valivého odporu při stálé rychlosti:

$$A_{f1s} = O_{f1} \cdot ss_1 = 2\,824 \cdot 491 = 1\,386\,584 \text{ J} \quad (12)$$

A_{f1s} = práce valivého odporu při stálé rychlosti na 1. úseku [J]
 ss_1 = délka dráhy jízdy při stálé rychlosti [m]

Celková práce valivého odporu:

$$A_{f1} = A_{f1r} + A_{f1s} = 138\,376 + 1\,386\,584 = 1\,524\,960 \text{ J} \quad (13)$$

A_{f1} = celková práce valivého odporu na 1. úseku [J]

6.1.3 ODPOR VZDUCHU

Odpor vzduchu působí na každý předmět pohybující se v tomto prostředí. Velikost závisí na tvaru vozidla, velikosti čelní plochy, hustotě vzduchu a kvadrátu rychlosti. Rychlostí se myslí relativní rychlost vůči vzduchu, tedy s protivětrém ještě naroste právě o rychlost větru. V mém výpočtu je ovšem počítáno se stavem bezvětrí. Tvar elektrobuse lze zjednodušeně brát jako kvádr. Ten sám o sobě nemá příliš aerodynamicky přívětivé vlastnosti a ani čelní strana u zvoleného elektrobuse není téměř nijak zaoblena, proto je součinitel vzdušného odporu C_x vysoký.

Odpor vzduchu [85]:

$$O_{v1} = C_x \cdot S_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 = 0,88 \cdot 7,522 \cdot \frac{1,24}{2} \cdot 14^2 = 804 \text{ N} \quad (14)$$

O_{v1} = odpor vzduchu na 1. úseku [N]

C_x = součinitel vzdušného odporu [-]

S_x = čelní plocha vozidla [m^2]

ρ = hustota vzduchu [$kg \cdot m^{-3}$]

v = rychlost vozidla [$m \cdot s^{-1}$]

Jelikož je odpor vzduchu závislý na rychlosti, nestačí jej pro výpočet práce při rozjezdu pouze vynásobit dráhou, ale je potřeba použít následující vztah [84]:

$$A_{v1r} = \int_0^{x_{roz1}} O_{v1} \cdot ds = \int_0^{t_{roz1}} O_{v1} \cdot v \cdot dt = \int_0^{t_{roz1}} C_x \cdot S_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot a^3 \cdot t^3 \cdot dt \quad (15)$$

A_{v1r} = práce odporu vzduchu při rozjezdu na 1. úseku [J]

t_{roz1} = čas potřebný k rozjezdu z 0 na $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ [s]

Po integraci rovnice (15) pak dostáváme:

$$A_{v1r} = C_x \cdot S_x \cdot \frac{\rho}{2} \cdot a^3 \cdot \frac{t_{roz1}^4}{4} = 0,88 \cdot 7,522 \cdot \frac{1,24}{2} \cdot 2^3 \cdot \frac{7^4}{4} = 19\,707 \text{ J} \quad (16)$$

Práce odporu vzduchu při stálé rychlosti:

$$A_{v1s} = O_{v1} \cdot ss_1 = 804 \cdot 491 = 394\,764 \text{ J} \quad (17)$$

A_{v1s} = práce odporu vzduchu při stálé rychlosti na 1. úseku [J]

Celková práce odporu vzduchu:

$$A_{v1} = A_{v1r} + A_{v1s} = 19\,707 + 394\,764 = 414\,471 \text{ J} \quad (18)$$

A_{v1} = celková práce odporu vzduchu na 1. úseku [J]

6.1.4 ODPOR SVAHU

Tento odpor se projevuje, pouze pokud vozidlo stoupá či klesá. Při vynásobení dráhou představuje změnu potenciální energie. Závisí na hmotnosti vozidla a úhlu svahu. Při jízdě do kopce je nutné překonat tento odpor a práce je tedy kladná, v opačném případě, při jízdě z kopce, napomáhá v jízdě a práce je záporná.

Odpor svahu [85]:

$$O_{s1} = M \cdot g \cdot \sin \alpha_1 = 18\,000 \cdot 9,81 \cdot \sin(0,486^\circ) = 1\,498 \text{ N} \quad (19)$$

O_{s1} = odpor svahu na 1. úseku [N]

Práce odporu svahu při rozjezdu:

$$A_{s1r} = O_{s1} \cdot x_{roz1} = 1\,498 \cdot 49 = 73\,402 \text{ J} \quad (20)$$

A_{s1r} = práce odporu svahu při rozjezdu na 1. úseku [J]

Práce odporu svahu při stálé rychlosti:

$$A_{s1s} = O_{s1} \cdot ss_1 = 1\,498 \cdot 491 = 735\,518 \text{ J} \quad (21)$$

A_{s1s} = práce odporu svahu při stálé rychlosti na 1. úseku [J]

Celková práce odporu svahu:

$$A_{s1} = A_{s1r} + A_{s1s} = 73\,402 + 735\,518 = 808\,920 \text{ J} \quad (22)$$

A_{s1} = celková práce odporu svahu na 1. úseku [J]

6.1.5 DYNAMICKÝ ODPOR

Jedná se odpor, který je nutné překonat, aby vozidlo dosáhlo požadované rychlosti. Je závislý na zrychlení a hmotnosti. Dynamický odpor se skládá z odporu posuvných částí (karoserie, cestující,...) a rotačních částí (kola, hřídele apod.). V následujícím výpočtu je odpor rotačních částí nahrazen koeficientem rotačních částí ϑ . Při rozjezdu působí proti síle motoru a práce dynamického odporu je kladná, při brzdění pak působí ve směru jízdy a je tedy možné tuto energii využít k rekuperaci, práce je záporná. Dynamický odpor se objevuje, pouze pokud vozidlo mění rychlost, při stálé jízdě je tedy tato složka nulová. Vzhledem k hmotnosti vozidla jsou rozjezdy jednou z nejnáročnějších úseků jízdy a budou výrazně ovlivňovat celkovou potřebnou kapacitu baterií [84].

Dynamický odpor [85]:

$$O_{d1} = M \cdot a \cdot \vartheta = 18\,000 \cdot 2 \cdot 1,1 = 39\,600 \text{ N} \quad (23)$$

O_{d1} = dynamický odpor na 1. úseku [N]

ϑ = součinitel rotačních částí [-]

a = zrychlení autobusu [$m \cdot s^{-2}$]

Práce dynamického odporu při rozjezdu:

$$A_{d1r} = O_{d1} \cdot x_{roz1} = 39\,600 \cdot 49 = 1\,940\,040 \text{ J} \quad (24)$$

A_{d1r} = práce dynamického odporu při rozjezdu na 1. úseku [J]

Práce dynamického odporu při stálé rychlosti:

$$A_{d1s} = 0 \text{ J} \quad (25)$$

Celková práce dynamického odporu:

$$A_{d1} = A_{d1r} + A_{d1s} = 1\,940\,040 + 0 = 1\,940\,040 \text{ J} \quad (26)$$

A_{d1} = celková práce dynamického odporu na 1. úseku [J]

6.1.6 CELKOVÁ KAPACITA

Poté, co máme vypočítané práce jednotlivých odporů na úseku, jednoduše stačí tyto práce sečíst. Celková práce na 1. úseku:

$$A_1 = A_{f1} + A_{v1} + A_{s1} + A_{d1} = 4\,688\,391 \text{ J} \quad (27)$$

A_1 = celková práce na 1. úseku [J]

To stejné platí pro práce na jednotlivých úsecích, opět stačí všechny práce sečíst a dostaneme celkovou práci na celé délce trasy:

$$A_{\text{celk}} = \sum_{i=1}^6 A_i = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 = 2,57 \cdot 10^7 \text{ J} \quad (28)$$

A_{celk} = celková práce na celé trase [J]

A_1 = celková práce na 1. úseku [J]

A_2 = celková práce na 2. úseku [J]

A_3 = celková práce na 3. úseku [J]

A_4 = celková práce na 4. úseku [J]

A_5 = celková práce na 5. úseku [J]

A_6 = celková práce na 6. úseku [J]

Nyní již zbývá pouze převést celkovou práci A_{celk} [J] na energii baterií K_{celk} [kWh]. 1 Joule odpovídá práci síly 1 N na dráze 1 m. 1 Watt odpovídá práci 1 J po dobu 1 s. Jednotka Joule je tedy ekvivalentní jednotce Wattsekunda. Jelikož je 1 Ws velice malá jednotka, v praxi se častěji používá jednotka Wh, popřípadě kWh.

Převod A_{celk} na K_{celk} :

$$K_{\text{celk}} = \frac{A_{\text{celk}}}{3\,600\,000} = \frac{2,57 \cdot 10^7}{3\,600\,000} = 7,139 \text{ kWh} \quad (29)$$

K_{celk} = celková energie baterií potřebná pro ujetí dané trasy [kWh]

6.2 VÝBĚR VHODNÉ BATERIE

Elektrobus EKOVA Electron, určený pro kratší dojezd, disponuje dvojicí boxů, obsahující baterie typu LTO. Na trhu tento typ baterií vyrábí například americký výrobce XALT Energy. Na stránkách tohoto výrobce je možné se dozvědět, že vyrábí bateriové LTO články s kapacitou 60 Ah, nominálním napětím 2,2 V a celkovou energií 132 Wh (*obr. 34*). Výhodou je, že je možné si sestavit libovolný počet článků a tím docílit potřebné kapacity. Při správném nabíjení vydrží články údajně až 60 000 cyklů nabíjení-vybíjení. Zvolený typ baterií má také velice výhodné tepelné podmínky provozu, pohybující se od -30 °C do 60 °C [86].



Obr. 34 - XALT 60Ah High Power Lithium-ion LTO baterie [86]

Parametry baterie:

- Rozměry: 263x266x12,8 mm
- Kapacita: 60 Ah
- Nominální napětí: 2,2 V
- Vybíjecí energie: 132 Wh
- Hmotnost článku: 1,74 kg
- Měrná kapacita: 76 Wh/kg
- Teplotní rozsah: -30 °C až 60 °C [86]

Výpočet potřebného počtu článků baterií je velice jednoduchý, jelikož výrobce uvádí přímo i energii baterie. Stačí tedy jen podělit celkovou potřebnou energii K_{celk} energií jednoho článku $K_{čl}$ a získáme jejich potřebný počet j (bereme nejbližší vyšší celé číslo):

$$j = \frac{K_{celk}}{K_{čl}} = \frac{7139}{132} = 55 \text{ článků} \quad (30)$$

j = potřebný počet LTO článků [-]

$K_{čl}$ = energie jednoho LTO článku [kWh]

Celkovou hmotnost těchto článků m_{celk} pak dostaneme vynásobením počtu článků hmotností jednoho článku $m_{čl}$:

$$m_{celk} = j \cdot m_{čl} = 55 \cdot 1,74 = 95,7 \text{ kg} \quad (31)$$

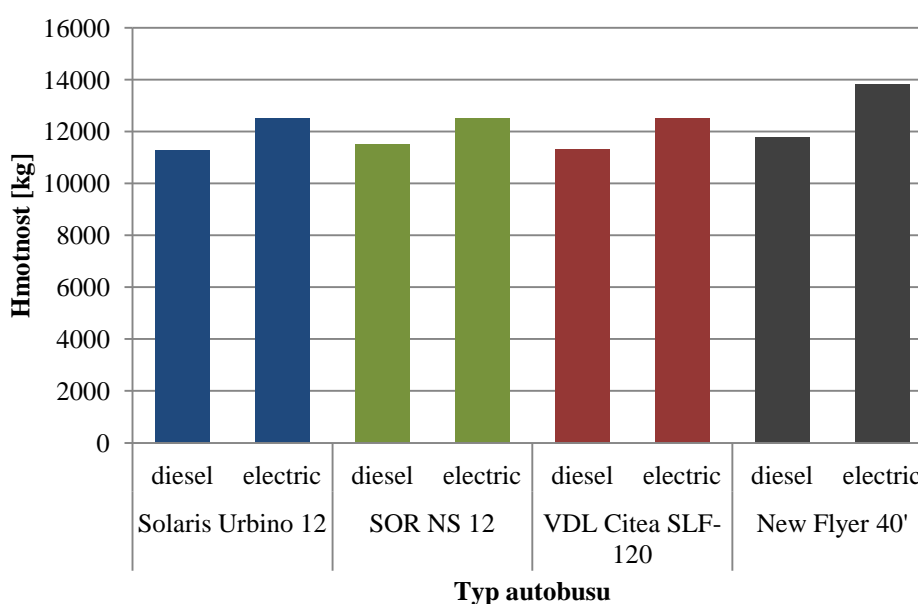
m_{celk} = celková hmotnost baterií pro ujetí dané trasy [kg]

$m_{čl}$ = hmotnost jednoho LTO článku [kg]

ZÁVĚR

Trh s elektrickými autobusy se začíná objevovat až v posledních přibližně 15 letech a tak lze říci, že se stále jedná o relativně mladý trh. Proto je naprosto normální i fakt, že každý výrobce má trochu jinou konstrukci svých vozidel. Pořád totiž dochází k jakémusi „hledání“ optimálního řešení, ať už se to týká výběru typů komponent, tak i následného umístění ve vozidle.

Pokud se podíváme na mnou provedený výpočet jízdních odporů na konci této práce, zjistíme následující - největším problémem spojeným s konstrukcí je vysoká hmotnost samotného elektrobuse. Ta způsobuje zejména to, že vozidlo má vyšší jízdní odpory a k jejich překonání na určité dráze je potřebná větší práce. Energie potřebná ke kompenzaci této práce pak způsobuje to, že elektrobuse stále zápasí s počty kilometrů, které jsou bez nabití schopny urazit. Pokud pomíneme fakt, že až třetinu hmotnosti tvoří přepravovaní cestující, tak hlavním viníkem zvýšené hmotnosti jsou baterie. Jejich celková váha ve vozidle se pohybuje od 1 do 2,5 tun. Srovnání hmotností elektrických modelů s jejich ekvivalentem v provedení s klasickým dieselovým motorem ukazuje *obr. 35* (poznámka: hmotnost se může mírně lišit v závislosti na zvoleném vybavení autobusu).



Obr. 35 - Srovnání hmotností autobusů [zdroj: katalogy jednotlivých výrobců]

Vývoj v oblasti baterií je s nastupující elektromobilitou překotný a je na něj kladen velký důraz. Potřeba snižovat hmotnost a zvyšovat kapacitou baterií se již nyní ukazuje v porovnání jednotlivých typů baterií a především v porovnání různých typů lithiových baterií. Například typ NMC má oproti typu LTO více jak 2x vyšší měrnou kapacitu. Nové typy baterií, jako jsou právě například NMC nebo Li-Pol, se začínají čím dál častěji objevovat v nových typech elektrobuse a přechod na baterie s vyšší měrnou kapacitou pro ušetření hmotnosti je tak jasný a to i přes jejich vyšší pořizovací cenu. Začínají se také objevovat nové Li-air baterie, které slibují ještě lepší poměr kapacita/hmotnost.

Co se týká umístění, jako nejlogičtější volba se jeví prostor střechy elektrobuse, vzhledem k tomu, že zde nezabírají žádné místo pro cestující a lze je velmi účinně chladit. Díky využívání stejné karoserie pro elektrické autobusy a autobusy se spalovacími motory je

pak také možnost umístit alespoň část baterií do prostoru zadního převisu, kde nahradí objemný spalovací motor.

Zajímavým řešením pro uskladnění energie pak jsou superkapacity. Ty jsou díky vývoji již schopny na kratších linkách nahradit bateriové články a přitom mají mnohem nižší hmotnost, vyšší životnost i bezpečnost. Proto si myslím, že by výrobci do budoucna měli zvážit možnost nahrazení baterií právě superkapacity, protože praxe ukazuje, že je to cesta ke snížení hmotnosti. Navíc se současným trendem optimalizace elektrobuseů na linku se nevýhoda nižšího dojezdu vozidel se superkapacity pomalu smazává.

Za lepší technologie je však bohužel potřeba zaplatit a v tomto případě je to myšleno doslovně. Příchod elektrobuseů ukazuje, že je možné snižovat emise NO_x , CO_2 a dalších škodlivých plynů, zejména pak ve městech, ovšem tyto vozidla svou cenou klasické autobusy převyšují klidně i trojnásobně, nehledě na náklady pro potřebu vybudování dobíjecí infrastruktury. I přes nižší náklady na provoz (cca 3 Kč/km u plně elektrických autobusů vs. cca 16 Kč/km u autobusů se spalovacími motory) je tak stále pro dopravní podniky prozatím výhodnější nákup například hybridních autobusů, které jsou jakýmsi kompromisem mezi čistě dieslovými a čistě elektrickými vozidly. Ceny elektrobuseů nezvyšují jen baterie nebo superkapacity, ale také fakt že se jejich produkce pořád počítá spíše v jednotkách. Není tak možnost ušetřit náklady sériovou výrobou. Asi jediným státem, kde výroba elektrických autobusů běží na plné obrátky je Čína. Zejména její industriálně založená města a města s velkým počtem obyvatel trápí už dlouhou dobu smogové situace a tak se tento stav tamní vláda rozhodla řešit mimo jiné i nasazením elektrických vozidel. Například město Šen-čen tak v současné době vlastní více jak 16 000 plně elektrických autobusů. V České republice existuje program IROP (integrovaný regionální operační program), ze kterého je možné nákup ekologických vozidel pro hromadnou dopravu financovat, ovšem jeho platnost končí v roce 2020 a tak jsou následné výraznější dotace ze strany státu/EU otázkou a dopravní podniky budou muset do budoucna zřejmě více spoléhat na vlastní finanční zdroje [14, 87].

Lepší provozní náklady elektrobuseů zlepšují také elektromotory. Výrobci postupně opustili starší stejnosměrné elektromotory a přešli na elektromotory napájené střídavým proudem, tedy synchronní a asynchronní. Obecně lze pozorovat, že asynchronní motory se používají zejména v levnějších modelech vozidel, synchronní motory pak svou zvýšenou pořizovací cenu kompenzují mírně lepší účinností a sníženou hmotností a objemem, a díky tomu snižují náklady na provoz elektrobuse. Důležitým aspektem elektromotorů v elektrobusech je zejména průběh a hodnota točivého momentu, menší význam má hodnota výkonu. Hlavní je kompaktní stavba, vysoká účinnost spolu s možností motor krátkodobě přetížít, nízké provozní náklady a samozřejmě pořizovací cena. Výhodou je pak snížená hlučnost elektrických motorů.

Obecně lze tedy pozorovat především tyto trendy - snaha o co nejvyšší dojezd elektrobuse v kombinaci s jeho co nejnížší hmotností, snižování jízdních nákladů a snaha o snížení výrobní ceny, aby se tento typ vozidel stal více atraktivní pro dopravní podniky, zejména pak pro ty, které sídlí ve městech se špatnou kvalitou ovzduší. Výrobci také stále častěji nabízejí možnost upravit si elektrobuse podle svých přání (počet sedadel, dveří, kapacita baterií, typ motorů, centrální motor/motory v kolech, klimatizace řidiče/prostoru cestujících a další) a je tak na provozovatelích, jaké vlastnosti elektrobuse budou požadovat a od toho se bude odvíjet i samotná pořizovací cena.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Benz Patent Motorwagen číslo 1. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-02-09]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Benz_Patent_Motorwagen_číslo_1
- [2] GUARNIERI, M. Looking back to electric cars. In: *HISTory of ELection-technology Conference (HISTELCON)*, 2012 Third IEEE [online]. Pavia: IEEE, 2012, s. 1-6 [cit. 2019-02-09]. DOI: 10.1109/HISTELCON.2012.6487583. ISBN 9781467330794. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6487583>
- [3] MORIMOTO, Masayuki. Which is the First Electric Vehicle?. *Electrical Engineering in Japan* [online]. 2015, 192(2), 31-38 [cit. 2019-02-09]. DOI: 10.1002/eej.22550. ISSN 0424-7760. Dostupné z: <https://onlinelibrary-wiley-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/doi/full/10.1002/eej.22550>
- [4] What is this that roareth thus?. *The Economist* [online]. 2007, 384(8545) [cit. 2019-02-09]. ISSN 00130613. Dostupné z: <https://www.economist.com/technology-quarterly/2007/09/06/what-is-this-that-roareth-thus>
- [5] LI, Jing-quan. Battery-electric transit bus developments and operations: A review. *International Journal of Sustainable Transportation* [online]. 2016, 10(3), 157-169 [cit. 2019-01-31]. DOI: 10.1080/15568318.2013.872737. ISSN 15568318. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15568318.2013.872737?journalCode=ujst20>
- [6] HODGES, Jeremy. Electric Buses Are Hurting the Oil Industry. In: *Bloomberg* [online]. 25. dubna 2018 [cit. 2019-02-09]. Dostupné z: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-04-23/electric-buses-are-hurting-the-oil-industry>
- [7] SYCHRA, Šimon. *Systémová analýza elektrobuse pro MHD*. Praha, 2016, 87 s. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická.
- [8] ZAJAC, Tomáš. *Nabíjecí stanice pro elektromobily*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016, 50 listů. Bakalářská práce.
- [9] MANZETTI, Sergio a Florin MARIASIU. Electric vehicle battery technologies: From present state to future systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. Elsevier, 2015, **51**, 1004-1012 [cit. 2019-02-13]. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.010. ISSN 1364-0321. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115006577>
- [10] RAHN, Christopher D. a Chao-Yang WANG. *Battery systems engineering*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley, 2013. ISBN 978-111-9979-500.
- [11] MI, Chris, Abul MASRUR a David Wenzhong GAO. *Hybrid electric vehicles: principles and applications with practical perspectives*. Hoboken, N.J.: Wiley, c2011, 448 s. ISBN 978-0-470-74773-5.

- [12] LEITMAN, Seth a Bob BRANT. *Build your own electric vehicle*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, c2009. ISBN 00-715-4373-2.
- [13] LI, Guosheng, Xiaochuan LU, Jin y. KIM, John p. LEMMON a Vincent I. SPRENGLE. Improved cycling behavior of ZEBRA battery operated at intermediate temperature of 175 °C. *Journal of Power Sources* [online]. Elsevier B.V, 2014, **249**, 414-417 [cit. 2019-02-16]. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.10.110. ISSN 0378-7753. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037877531301776X>
- [14] SLAVÍK, Jakub. E-mobilita v MHD: Situace a vývojové trendy v elektrických autobusech pro městskou dopravu. In: *Proelektrotechniky.cz: elektrotechnika pro odborníky* [online]. Březen 2015 [cit. 2019-01-28]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/pdf/Studie2015.pdf>
- [15] BU-205: Types of Lithium-ion. In: *Battery University* [online]. 2018-05-31 [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
- [16] PAVLIS, Jakub. Li-Pol akumulátory - proč se nejpokročilejší technologie neprosazuje. In: *Notebook.cz* [online]. 22. 6. 2011 [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <https://notebook.cz/clanky/technologie/2011/Li-Pol-akumulatory>
- [17] BU-209: How does a Supercapacitor Work?. In: *Battery University* [online]. 2017-04-21 [cit. 2019-02-21]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor
- [18] KUBÍK, Jan. *Perspektivní pohonné jednotky autobusů*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2012, 33 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce Prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
- [19] MOJŽÍŠ, Jan. *Konstrukční návrh pohonu kolejového elektrobusu*. Praha, 2017. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Doc. Ing. Josef Kolář, CSc.
- [20] FPT Industrial Unveils Cursor 9 CNG, The Most Powerful 9 Liter CNG Engine, At Beijing Bus and Truck Show. In: *PR Newswire: news distribution, targeting and monitoring* [online]. May 23, 2016 [cit. 2019-02-23]. Dostupné z: <https://www.prnewswire.com/news-releases/fpt-industrial-unveils-cursor-9-cng-the-most-powerful-9-liter-cng-engine-at-beijing-bus-and-truck-show-300272899.html>
- [21] Elektrobus SOR EBN 10,5 bude jezdit ve Zlíně a Otrokovcích. *BusPress: Zpravodaj autobusové dopravy* [online]. 12.6.2014 [cit. 2019-02-23]. Dostupné z: <http://www.buspress.eu/elektrobus-sor-ebn-105-bude-jezdit-ve-zline-a-otrokovcich/>
- [22] DAŇSA, Jiří. Nová bezemisní vozidla pro městskou dopravu. In: *Smart city v praxi* [online]. 2016 [cit. 2019-02-23]. Dostupné z: http://www.smartcityvpraxi.cz/prezentace/KonferenceEbusyV/Jiri_Dansa.pdf
- [23] Městský nízkopodlažní bateriový autobus Škoda Perun HP. In: *Škoda.cz* [online]. [cit. 2019-02-23]. Dostupné z: <https://www.skoda.cz/data/catalog/6/15/2716.pdf>

- [24] ROUBÍČEK, Ota. *Elektrické motory a pohony: příručka techniky, volby a užití vybraných druhů*. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-092-X.
- [25] DUDEK, Milan. *Trakční motory*. Plzeň, 2013. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Roman Pechánek
- [26] HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2012, 158 s. ISBN 978-80-247-4455-1.
- [27] RŮŽIČKA, Václav. *Alternativní pohony silničních vozidel*. Brno, 2013, 82 s. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta. Vedoucí práce Prof. Ing. František Bauer, CSc.
- [28] ŠIMON, Josef. BLDC aneb DC motor s nulovými náklady na údržbu. In: *Elektro: časopis pro elektrotechniku* [online]. 2011 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/bldc-aneb-dc-motor-s-nulovymi-naklady-na-udrzbu--10016>
- [29] Brushless Motors. In: *Nidec: All for dreams* [online]. [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: <https://www.nidec.com/en-Global/technology/capability/brushless/?prt=1>
- [30] Střídavé elektromotory. In: *Skola.hellebrand.cz* [online]. [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: http://skola.hellebrand.cz/text0910/ele/motory_str.pdf
- [31] KRAJÁNEK, Vladimír. *Návrh synchronního motoru s permanentními magnety pro pohon elektromobilu*. Plzeň, 2016. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta Elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Karel Hruška, PhD.
- [32] NOVÁK, Jaroslav. Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice (1. část). In: *Elektro: časopis pro elektrotechniku* [online]. 2006 [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/uplatneni-synchronnich-stroju-v-dopravni-technice-1-cast--13092>
- [33] ČERNÝ, Ondřej, Radovan DOLEČEK a Jaroslav NOVÁK. *Synchronní motory s permanentními magnety pro trakční pohony kolejových vozidel* [online]. Pardubice, 2010 [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <https://vts.cd.cz/documents/168518/195384/2908.pdf/0cfb0eda-cd8d-42f1-941e-b4e3ed2dfd2a>
- [34] TSA Motor for Trolley, Hybrid and Electric buses. In: *Traktionssysteme Austria: TSA* [online]. [cit. 2019-03-09]. Dostupné z: https://tsa.at/references/tsa_motor_for_trolley_hybrid_and_electric_buses_1
- [35] Siemens: PEM-Motor 1DB2016 – WS54. In: *Siemens* [online]. [cit. 2019-03-09]. Dostupné z: <https://www.industry.usa.siemens.com/drives/us/en/electric-drives/hybrid-drives/automotive/Documents/elfa-components-data-sheets.pdf>
- [36] 12 M CENTRAL DRIVE BY SIEMENS. *Chariot Motors* [online]. 2017 [cit. 2019-02-01]. Dostupné z: <http://chariot-electricbus.com/products/electric-vehicles/12-m-central-drive-by-siemens/>

- [37] Hnací modul nápravy ZAwheel. In: *Ziehl-Abegg Czechia* [online]. [cit. 2019-03-09]. Dostupné z: <https://www.ziehl-abegg.com/cz/cs/svety-produktu/automotive/hnaci-moduly-napravy/>
- [38] AVE 130. In: *Press ZF* [online]. [cit. 2019-03-09]. Dostupné z: https://press.zf.com/site/press/de_de/microsites/press/list/release/media_6344.html
- [39] PILAŘ, Jiří. Směr e-mobilita. Zkušenosti Solaris a další vývoj. In: *Smart city v praxi* [online]. [21.11. 2018] [cit. 2019-01-31]. Dostupné z: http://www.smartcityvpraxi.cz/prezentace/Konference_Elektricke_autobusy_promestoVII/Pilar_Solaris.pdf
- [40] PAVLŮSEK, Ondřej. Škoda Electric dodá elektrobusy pro Arriva Morava. In: *Auto.cz: Nejlepší jízda na webu* [online]. 2. 12. 2016 [cit. 2019-01-28]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/lkoda-electric-dod-elektrobusy-arriva-morava-100916>
- [41] Elektrobus s rychlodobíjením. *Škoda* [online]. [cit. 2019-01-28]. Dostupné z: <https://www.skoda.cz/reference/elektrobus-s-rychlodobijenim/?from=prod>
- [42] Plzeňské elektrobusy a jejich dobíjení v evropském a českém kontextu. In: *Proelektrotechniky.cz: elektrotechnika pro odborníky* [online]. 2.6. 2015 [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/elektromobilita/166.php>
- [43] Elektrobus se standardním dobíjením. *Škoda* [online]. [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: <https://www.skoda.cz/reference/elektrobus-se-standardnim-dobijenim/?from=prod>
- [44] O nás. *SOR Libchavy s.r.o.* [online]. [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: <https://www.sor.cz/spolecnost/o-nas/>
- [45] ČERNÝ ML., Jan, Martin HARÁK, Libor HINČICA a Robert KINDL. *SOR - 25 LET S VÁMI*. Ostrava: MH Development, 2016.
- [46] SOR EBN. *SOR Libchavy s.r.o.* [online]. [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: <https://www.sor.cz/ebn/>
- [47] NEUMAN, Jan. Autobusy – Elektrobus SOR EBN 11 s dobíjením z troleje. In: *Automobil* [online]. 26.04. 2016 [cit. 2019-01-29]. Dostupné z: https://www.automobilrevue.cz/rubriky/truck-bus/predstavujeme/autobusy-elektrobus-sor-ebn-11-s-dobijenim-z-troleje_44801.html
- [48] PAVLŮSEK, Ondřej. Olomouc má na pravidelné lince svůj první elektrobus. In: *Auto.cz: Nejlepší jízda na webu* [online]. 2.11. 2018 [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/olomouc-ma-pravidelne-lince-svuj-prvni-elektrobus-125580>
- [49] MAJURNÍK, Jan. Elektrobusy v Hradci Králové: vyzkoušeli jsme, jak se jezdí se SOR NS 12 Electric. In: *Hybrid.cz* [online]. 07 prosinec 2018 [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/elektrobusy-v-hradci-kralove-vyzkouseli-jsme-jak-se-jezdi-se-sor-ns-12-electric>
- [50] SOR NS electric. *SOR Libchavy s.r.o.* [online]. [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: <https://www.sor.cz/ens/>

- [51] LESKOVÁ, Ivana. Slibně rozjetá výroba elektrobuseů v Ostravě drhne, Ekova hledá partnery. In: *iDnes.cz* [online]. 11. května 2018 [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/ostava/zpravy/elektrobus-vyroba-ekova-electric-ostava.A180511_400786_ostava-zpravy_woj
- [52] Ekova Electron: nový český elektrobuse se představuje. In: *Proelektrotechniky.cz: elektrotechnika pro odborníky* [online]. 10.11. 2015 [cit. 2019-01-30]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/elektromobilita/199.php>
- [53] PRAŽÁKOVÁ, Eva. EKOVA ELECTRIC: Unikátní řešení pro chytrá města. In: *Smart city v praxi* [online]. 21. listopadu 2018 [cit. 2019-01-31]. Dostupné z: http://www.smartcityvpraxi.cz/prezentace/Konference_Elektricke_autobusy_promestoV II/Prazakova_EKOVA.pdf
- [54] NESVEDA, Zdeněk. Expanze českých elektrobuseů Ekova Electron do západní Evropy. In: *BusPress: zpravodaj autobusové dopravy* [online]. 25.5. 2016 [cit. 2019-01-31]. Dostupné z: <http://www.buspress.eu/expanze-ceskych-elektrobusu-ekova-electron-do-zapadni-evropy/>
- [55] EKOVA Electron electric bus. In: *EKOVA ELECTRIC* [online]. [cit. 2019-01-31]. Dostupné z: <https://ekova.cz/uploads/assets/e2bd154a-d168-4fe1-afdb-4628c1159f83.pdf>
- [56] History. *Solaris* [online]. [cit. 2019-01-31]. Dostupné z: <https://www.solarisbus.com/en/about-us/history>
- [57] Solaris Bus & Coach. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2018, 12. gru 2018 [cit. 2019-01-31]. Dostupné z: https://pl.wikipedia.org/wiki/Solaris_Bus_%26_Coach
- [58] PAVLŮSEK, Ondřej. Solaris Urbino 12 electric je International Bus of the Year 2017. In: *Auto.cz: Nejlepší jízda na webu* [online]. 23.8. 2016 [cit. 2019-01-31]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/solaris-urbino-12-electric-international-bus-of-the-year-2017-97621>
- [59] Urbino electric. *Solaris* [online]. [cit. 2019-01-31]. Dostupné z: <https://www.solarisbus.com/en/vehicles/alternative-drives/urbino-electric>
- [60] MINCHEV, Radislav. Operational experience of Chariot Ultra Capacitor e-buses. In: *Smart city v praxi* [online]. 2018 [cit. 2019-02-01]. Dostupné z: http://www.smartcityvpraxi.cz/prezentace/Konference_Elektricke_autobusy_promestoV II/Minchev_Chariot.pdf
- [61] FERFERIEV, Filip. Chariot Motors – partner naší konference „Elektrické autobusy pre mesto“ v Nitře představuje své superkapacitorové elektrobuse. In: *Smart city v praxi* [online]. 21.2. 2018 [cit. 2019-02-01]. Dostupné z: http://www.smartcityvpraxi.cz/moderni_technologie_47.php
- [62] 12 M HUB DRIVE BY ZF. *Chariot Motors* [online]. 2017 [cit. 2019-02-01]. Dostupné z: <http://chariot-electricbus.com/products/electric-vehicles/12-m-hub-drive-by-zf/>

- [63] About New Flyer. *NEW FLYER* [online]. [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: <https://www.newflyer.com/company/about>
- [64] NFI Group Inc. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 29 January 2019 [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/NFI_Group_Inc.
- [65] Xcelsior CHARGE. *NEW FLYER* [online]. 2019 [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: <https://www.newflyer.com/buses/xcelsior-charge/>
- [66] PAVLŮSEK, Ondřej. New Flyer Xcelsior Charge: Elektrobus s kapacitou baterií 885 kWh. In: *Auto.cz: Nejlepší jízda na webu* [online]. 23.10. 2017 [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/new-flyer-xcelsior-charge-elektrobus-kapacitou-baterii-885-kwh-110700>
- [67] BYD Company. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019, 24 January 2019 [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/BYD_Company
- [68] About. *BYD: Build Your Dreams* [online]. 2018 [cit. 2019-02-03]. Dostupné z: <http://en.byd.com/usa/about/>
- [69] KANE, Mark. BYD Unveils World's First Long-Range Electric Coach Bus. In: *InsideEVs* [online]. February 25 2015 [cit. 2019-02-06]. Dostupné z: <https://insideevs.com/byd-unveils-worlds-first-long-range-electric-coach-bus/>
- [70] WERWITZKE, Cora. Flixbus startet E-Bus-Linie in Paris und plant für Deutschland. In: *Electrive.net: Branchendienst für Elektromobilität* [online]. 10.4. 2018 [cit. 2019-02-06]. Dostupné z: <https://www.electrive.net/2018/04/10/flixbus-startet-e-bus-linie-in-paris-und-plant-fuer-deutschland/>
- [71] C6 Electroc Motor Coach. *BYD: Build Your Dreams* [online]. 2018 [cit. 2019-02-06]. Dostupné z: <http://en.byd.com/usa/bus/c6-electric-motor-coach/>
- [72] C9 Electric Motor Coach. *BYD: Build Your Dreams* [online]. 2018 [cit. 2019-02-06]. Dostupné z: <http://en.byd.com/usa/bus/c9-electric-motor-coach/>
- [73] C10 Electric Motor Coach. *BYD: Build Your Dreams* [online]. 2018 [cit. 2019-02-06]. Dostupné z: <http://en.byd.com/usa/bus/c10-electric-motor-coach/>
- [74] *OppCharge: Fast charging of electric vehicles* [online]. [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: <https://www.oppcharge.org>
- [75] Výrobci elektrobusů a nabíjecích zařízení se dohodli na společném postupu. In: *Proelektrotechniky.cz: elektrotechnika pro odborníky* [online]. 22.3. 2016 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/elektromobilita/223.php>
- [76] Elektrobus jako služba: Volvo dodá full servis elektrobusů pro město Uddevalla. In: *Proelektrotechniky.cz: elektrotechnika pro odborníky* [online]. 23.8. 2018 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/elektromobilita/365.php>

- [77] SLAVÍK, Jakub. Elektrické autobusy pro město VII: Aktuální vývoj v oblasti elektrických autobusů ve světě a v ČR. In: *Smart city v praxi* [online]. Praha, 21. 11. 2018 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: http://www.smartcityvpraxi.cz/prezentace/Konference_Elektricke_autobusy_promestoVII/Slavik_Consulting.pdf
- [78] SLAVÍK, Jakub. *Smart city v praxi: jak pomocí moderních technologií vytvářet město příjemné k životu a přátelské k podnikání*. Praha: Profi Press s.r.o, 2017, 144 stran : barevné ilustrace. ISBN 978-80-86726-80-9.
- [79] ROGERS, David. 2018: year of the autonomous bus. In: *GCR: Global Construction Review* [online]. 14 March 2018 [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <http://www.globalconstructionreview.com/trends/2018-year-autonomous-bus/>
- [80] WERWITZKE, Cora. EasyMile to develop electrified autonomous 12m buses. In: *Electrive.com: industry servis for electric mobility* [online]. Dec 7, 2017 [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <https://www.electrive.com/2017/12/07/easymile-develop-electrified-autonomous-12m-buses/>
- [81] Autonom Shuttle. *Navya: be fluid* [online]. Navya, 2019 [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: <https://navya.tech/en/autonom-shuttle/>
- [82] PAVLŮSEK, Ondřej. Navya: Plně autonomní taxi a autobusy z Francie. In: *Auto.cz: Nejlepší jízda na webu* [online]. 18.9. 2018 [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/navya-plne-autonomni-taxi-autobusy-francie-124650>
- [83] Trasa. In: *Mapy.cz* [online]. © Seznam.cz [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?planovani-trasy&x=16.6818045&y=49.1812769&z=16&rc=9mVXtxTpBxhU0fcMhYNej.hD1hHcY0ebJ&rs=stre&rs=pubt&rs=pubt&rs=stre&rs=pubt&ri=79294&ri=15209239&ri=15208205&ri=79639&ri=15207271&mrp=%7B%22%3A111%7D&rt=&rt=&rt=&rt=&rt=&xc=%5B%5D>
- [84] PRŮCHA, Pavel. *Energetická náročnost jízdy elektrobuse SOR EBN 11 na lince 163*. Praha, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Josef Morkus, CSc.
- [85] VLK, František. *Sbírka úloh z teorie vozidel*. Brno: VUT Brno, 1984, 123 s.
- [86] XALT® 60Ah High Power Lithium-Ion LTO Cell. In: *XALT Energy* [online]. Midland (USA), 2019 [cit. 2019-03-31]. Dostupné z: <https://www.xaltenergy.com/wp-content/uploads/2019/02/60Ah-LTOHP.pdf>
- [87] SVATOŠ, Patrik. Ani 5 amerických velkoměst dohromady nemá tolik autobusů jako Šen-čen elektrobuse. In: *fDrive* [online]. 03.01. 2018 [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://fdrive.cz/clanky/ani-5-americkych-velkomest-dohromady-nema-tolik-autobusu-jako-sen-cen-elektrobuse-1837>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

a	[m·s ⁻²]	Zrychlení elektrobusu
A_1	[J]	Celková práce na úseku 1
A_2	[J]	Celková práce na úseku 2
A_3	[J]	Celková práce na úseku 3
A_4	[J]	Celková práce na úseku 4
A_5	[J]	Celková práce na úseku 5
A_6	[J]	Celková práce na úseku 6
A_{celk}	[J]	Celková práce
A_{dl}	[J]	Práce dynamického odporu na úseku 1
A_{dlr}	[J]	Práce dynamického odporu při rozjezdu na úseku 1
A_{dls}	[J]	Práce dynamického odporu při stálé rychlosti na úseku 1
A_{fl}	[J]	Práce valivého odporu na úseku 1
A_{flr}	[J]	Práce valivého odporu při rozjezdu na úseku 1
A_{fls}	[J]	Práce valivého odporu při stálé rychlosti na úseku 1
A_{sl}	[J]	Práce odporu svahu na úseku 1
A_{slr}	[J]	Práce odporu svahu při rozjezdu na úseku 1
A_{sls}	[J]	Práce odporu svahu při stálé rychlosti na úseku 1
A_{vl}	[J]	Práce odporu vzduchu na úseku 1
A_{vlr}	[J]	Práce odporu vzduchu při rozjezdu na úseku 1
A_{vls}	[J]	Práce odporu vzduchu při stálé rychlosti na úseku 1
C	[F]	Kapacita
Cd		Kadmium
$Cd(OH)_2$		Hydroxid kademnatý
CO_2		Oxid uhličitý
C_x	[-]	Součinitel vzdušného odporu
d	[m]	Délka elektrobusu
F	[N]	Hnací síla motoru
f	[-]	Součinitel valivého odporu
g	[m·s ⁻²]	Gravitační zrychlení
H_2O		Voda
H_2SO_4		Kyselina sírová
j	[-]	Počet článků

K_{celk}	[kWh]	Celková energie baterií
$K_{\epsilon l}$	[Wh]	Energie jednoho článku
l	[m]	Vzdálenost elektrod
M	[kg]	Celková hmotnost elektrobusu (v kapitole o výpočtu kapacity baterií)
M		Směs kovů (v kapitole o zásobnících elektrické energie)
M	[Nm]	Točivý moment (v kapitole o trakčních elektromotorech)
m_{celk}	[kg]	Celková hmotnost článků
$m_{\epsilon l}$	[kg]	Hmotnost článku
MH		Metalhydrid
M_n	[Nm]	Jmenovitý točivý moment
M_z	[Nm]	Záběrný točivý moment
Na		Draslík
$NaCl$		Chlorid sodný
Ni		Nikl
$Ni(OH)_2$		Hydroxid nikelnatý
$NiCl_2$		Chlorid nikelnatý
$NiO(OH)$		Hydroxid oxidu nikelnatého
n_n	[min ⁻¹]	Jmenovité otáčky
NO_x		Oxid dusíku
n_r	[min ⁻¹]	Otáčky rotoru
n_s	[min ⁻¹]	Otáčky magnetického pole statoru
O_d	[N]	Dynamický odpor
O_{d1}	[N]	Dynamický odpor na úseku 1
O_f	[N]	Valivý odpor
O_{f1}	[N]	Valivý odpor na úseku 1
O_s	[N]	Odpor svahu
O_{s1}	[N]	Odpor svahu na úseku 1
O_v	[N]	Odpor vzduchu
O_{v1}	[N]	Odpor vzduchu na úseku 1
Pb		Olovo
PbO_2		Oxid olovičitý
$PbSO_4$		Síran olovnatý
S	[m ²]	Obsah ploch elektrod

s	[%]	Skluz
S_x	[m ²]	Čelní plocha elektrobusu
\check{s}	[m]	Šířka elektrobusu
t_{rozl}	[s]	Čas potřebný pro rozjezd/brzdění
v	[m·s]	Maximální rychlost (v kapitole o výpočtu kapacity baterií)
v	[m]	Výška elektrobusu (v kapitole o přehledu elektrobusů na trhu)
x_{rozl}	[m]	Dráha potřebná pro rozjezd/brzdění
α_1	[°]	Úhel sklonu svahu na úseku 1
ε_0	[F·m ⁻¹]	Permitivita vakua
ε_r	[-]	Poměrná permitivita dielektrika
ϑ	[-]	Součinitel rotačních částí
ρ	[kg·m ⁻³]	Hustota vzduchu

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

<i>ABB</i>	Asea Brown Boveri	Švédsko-švýcarská technologická firma
<i>Ah</i>	Ampérhodina	Jednotka elektrického náboje
<i>BLDC</i>	Brushless Direct Current	Bezkartáčový stejnosměrný (elektromotor)
<i>BYD</i>	Build Your Dreams	Čínská strojírenská a elektrotechnická firma
<i>DoD</i>	Depth of Discharge	Hloubka vybití
<i>HE</i>	High Power	Vysoký výkon
<i>HP</i>	High Energy	Vysoká energie
<i>kWh</i>	Kilowatthodina	Jednotka energie
<i>LFP</i>	Lithium ferrophosphate	Lithium-železo-fosfátová (baterie)
<i>Li-air</i>	Lithium air	Lithium-vzduchová (baterie)
<i>Li-ion</i>	Lithium ion	Lithium iontová
<i>Li-Pol</i>	Lithium polymer	Lithium-polymerová (baterie)
<i>LMO</i>	Lithium Manganese Oxide	Lithium-mangan-oxidová (baterie)
<i>LOH</i>	Letní olympijské hry	Sportovní událost
<i>LTO</i>	Lithium Titanate Oxide	Lithium-titanová (baterie)
<i>NCA</i>	Nickel Cobalt Aluminium	Lithium-nikl-kobalt-hliníková (baterie)
<i>NFI</i>	New Flyer Industry	Severoamerický výrobce autobusů
<i>Nm</i>	Newtonmetr	Jednotka točivého moment
<i>NMC</i>	Nickel Manganese Cobalt	Lithium-nikl-mangan-kobaltová (baterie)
<i>PMSM</i>	Permanent Magnet Synchronous Motor	Synchronní motor s permanentními magnety
<i>SoC</i>	State of Charge	Úroveň nabití
<i>SOR</i>	Sdružení opravárenství a rozvoje	Český výrobce autobusů
<i>TM4</i>	Technologies M4	Kanadský výrobce elektromotorů
<i>TSA</i>	Traktionssysteme Austria	Rakouský výrobce trakčních komponent
<i>USA</i>	United States of America	Spojené státy americké
<i>Wh</i>	Watthodina	Jednotka energie
<i>Wi-Fi</i>	Wireless Fidelity	Technologie bezdrátového přenosu dat
<i>Ws</i>	Wattsekunda	Jednotka energie
<i>ZF</i>	Zahnradfabrik	Výrobce komponent pro automobilový průmysl

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1:

Výpočet kapacity.xmcd - Podrobný výpočet kapacity baterií v programu Mathcad 15